This is a reproduction of a library book that was digitized by Google as part of an ongoing effort to preserve the information in books and make it universally accessible.

Google books

https://books.google.com

A propos de ce livre

Ceci est une copie numérique d'un ouvrage conservé depuis des générations dans les rayonnages d'une bibliothèque avant d'être numérisé avec précaution par Google dans le cadre d'un projet visant à permettre aux internautes de découvrir l'ensemble du patrimoine littéraire mondial en ligne.

Ce livre étant relativement ancien, il n'est plus protégé par la loi sur les droits d'auteur et appartient à présent au domaine public. L'expression "appartenir au domaine public" signifie que le livre en question n'a jamais été soumis aux droits d'auteur ou que ses droits légaux sont arrivés à expiration. Les conditions requises pour qu'un livre tombe dans le domaine public peuvent varier d'un pays à l'autre. Les livres libres de droit sont autant de liens avec le passé. Ils sont les témoins de la richesse de notre histoire, de notre patrimoine culturel et de la connaissance humaine et sont trop souvent difficilement accessibles au public.

Les notes de bas de page et autres annotations en marge du texte présentes dans le volume original sont reprises dans ce fichier, comme un souvenir du long chemin parcouru par l'ouvrage depuis la maison d'édition en passant par la bibliothèque pour finalement se retrouver entre vos mains.

Consignes d'utilisation

Google est fier de travailler en partenariat avec des bibliothèques à la numérisation des ouvrages appartenant au domaine public et de les rendre ainsi accessibles à tous. Ces livres sont en effet la propriété de tous et de toutes et nous sommes tout simplement les gardiens de ce patrimoine. Il s'agit toutefois d'un projet coûteux. Par conséquent et en vue de poursuivre la diffusion de ces ressources inépuisables, nous avons pris les dispositions nécessaires afin de prévenir les éventuels abus auxquels pourraient se livrer des sites marchands tiers, notamment en instaurant des contraintes techniques relatives aux requêtes automatisées.

Nous vous demandons également de:

+ *Ne pas utiliser les fichiers à des fins commerciales* Nous avons conçu le programme Google Recherche de Livres à l'usage des particuliers. Nous vous demandons donc d'utiliser uniquement ces fichiers à des fins personnelles. Ils ne sauraient en effet être employés dans un quelconque but commercial.

+ *Ne pas procéder à des requêtes automatisées* N'envoyez aucune requête automatisée quelle qu'elle soit au système Google. Si vous effectuez des recherches concernant les logiciels de traduction, la reconnaissance optique de caractères ou tout autre domaine nécessitant de disposer d'importantes quantités de texte, n'hésitez pas à nous contacter. Nous encourageons pour la réalisation de ce type de travaux l'utilisation des ouvrages et documents appartenant au domaine public et serions heureux de vous être utile.

+ *Ne pas supprimer l'attribution* Le filigrane Google contenu dans chaque fichier est indispensable pour informer les internautes de notre projet et leur permettre d'accéder à davantage de documents par l'intermédiaire du Programme Google Recherche de Livres. Ne le supprimez en aucun cas.

+ *Rester dans la légalité* Quelle que soit l'utilisation que vous comptez faire des fichiers, n'oubliez pas qu'il est de votre responsabilité de veiller à respecter la loi. Si un ouvrage appartient au domaine public américain, n'en déduisez pas pour autant qu'il en va de même dans les autres pays. La durée légale des droits d'auteur d'un livre varie d'un pays à l'autre. Nous ne sommes donc pas en mesure de répertorier les ouvrages dont l'utilisation est autorisée et ceux dont elle ne l'est pas. Ne croyez pas que le simple fait d'afficher un livre sur Google Recherche de Livres signifie que celui-ci peut être utilisé de quelque façon que ce soit dans le monde entier. La condamnation à laquelle vous vous exposeriez en cas de violation des droits d'auteur peut être sévère.

À propos du service Google Recherche de Livres

En favorisant la recherche et l'accès à un nombre croissant de livres disponibles dans de nombreuses langues, dont le français, Google souhaite contribuer à promouvoir la diversité culturelle grâce à Google Recherche de Livres. En effet, le Programme Google Recherche de Livres permet aux internautes de découvrir le patrimoine littéraire mondial, tout en aidant les auteurs et les éditeurs à élargir leur public. Vous pouvez effectuer des recherches en ligne dans le texte intégral de cet ouvrage à l'adresse `http://books.google.com`

Digitized by Google

THE UNIVERSITY

OF ILLINOIS

LIBRARY

621.306
ASB
1913

[redacted]

Digitized by Google

Digitized by Google

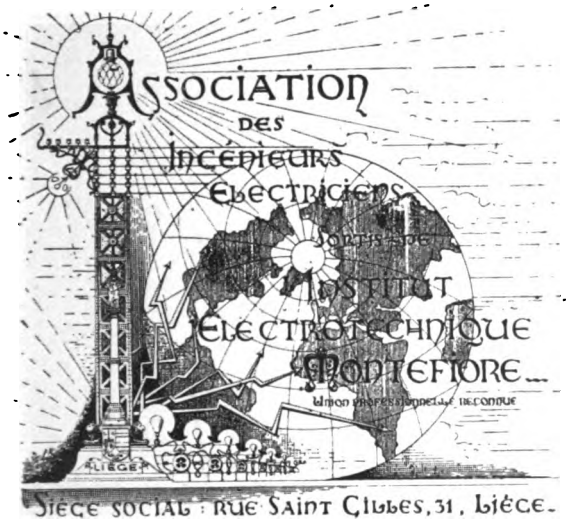
Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google



1913

TOME XIII

(3e SÉRIE)

062 A. I. M. 1

Bulletin

M. L'HOEST, G., *secrétaire perpétuel*, Avenue de la Couronne, 169, Ixelles.

M. KÜNTZIGER, J., *Secrétaire de rédaction.*
M. DACOS, F., *Secrétaire-adjoint.*
M. CHAINAYE, L., id.

SIÉGE SOCIAL : Rue Saint-Gilles, 31, Liége.

M. GAUTHIER-VILLARS, ÉDITEUR
Quai des Grands-Augustins, 55, Paris.

EXPÉDITIONS ET ANNONCES
Secrétariat administratif, au siège social.

Imprimerie : DE THIER
Boulevard de la Sauvenière, 10, Liége

La reproduction des articles, lorsqu'elle n'est pas explicitement réservée, est autorisée pour les publications échangées avec le présent bulletin. Exception est faite toutefois pour les travaux présentés au Concours de la Fondation George Montefiore, pour lesquels l'autorisation des auteurs est, en outre, requise.

Abonnement annuel . . . . F. 20-»

Digitized by Google

Digitized by Google

52.1.206
A S 13
1913

SÉANCE DU 26 JANVIER 1913.

M. H. Chauvin, *président*, au fauteuil.

Ont signé la liste de présence : MM. Biske ; Botvinnik ; Calmeau ; Chauvin ; Courtois ; Creplet ; De Bast ; Defize ; Delsemme ; Forgeur ; Gerard, A. ; Gerard, Eric ; Gosseries ; Grottendieck ; Hallet ; Kogan ; Koulikoff ; Kouvaitzeff ; Küntziger ; L'Hoest, G. ; L'Hoest, L. ; Libert ; Martin, G. ; Mazourine ; Mélotte ; Moineau ; Mourachow ; Nollet ; Verlinden.

M. H. Chauvin dépose sur le bureau les ouvrages suivants offerts à l'Association :

Annuaire pour l'an 1913, publié par le Bureau des Longitudes ; Gauthier-Villars, Paris.

Agenda Dunod 1913 : Électricité, par J. A. Montpellier ; H. Dunod et E. Pinat, Paris.

M. G. L'Hoest, *secrétaire perpétuel*, donne lecture de son rapport sur les travaux de l'année 1912 :

Messieurs et chers Camarades,

J'ai l'honneur de vous présenter le compte-rendu des travaux accomplis au sein de l'union technique de l'Association, au cours de l'année 1912.

Se conformant à une heureuse tradition, M. Henrion, président du Comité scientifique, a tenu à inaugurer la série annuelle des communications, par une étude personnelle sur une question très actuelle, celle des conditions économiques des distributions électriques dans les villes. La discussion en a été un peu écourtée, mais le sujet est de ceux qui resteront longtemps à l'ordre du jour, et nous devons nous attendre à le voir reprendre à une prochaine occasion.

295519 Digitized by Google

Déjà notre camarade M. Duculot nous y a préparés par une monographie des différents systèmes de tarification électrique ; le choix à en faire dans chaque cas spécial doit avoir une importance primordiale sur la prospérité de l'entreprise de distribution et sur le bien-être qui en doit résulter pour la collectivité.

A ces questions se rattache aussi celle des compteurs, pour lesquels on réclame aujourd'hui une exactitude plus rigoureuse. Dans une note sur un tableau pour le tarage de ces appareils, M. Rossi nous a décrit un dispositif qui rendra sans nul doute de sérieux services à ceux d'entre nous qui ont à exécuter de fréquents étalonnages de compteurs pour courants alternatifs.

Les dangers qui résultent malheureusement de l'emploi si généralisé des lignes à haute tension font rechercher partout des moyens de protection efficaces et peu coûteux pour garantir la sécurité du public dans le voisinage de ces lignes.

M. Buffa, après avoir rappelé les principaux moyens usités à cette fin, nous a décrit le dispositif nouveau qu'il a étudié et expérimenté avec succès.

M. Dubois nous a exposé, avec d'abondants et intéressants documents, l'état actuel de la question de la conservation des appuis en bois pour lignes électriques. C'est un sujet que l'auteur a tout spécialement étudié et qu'il nous a développé avec amplitude et compétence.

Dans sa communication sur l'organisation rationnelle des centrales à gaz et sur le tamponnage des laminoirs et des machines d'extraction, M. Creplet a condensé les fruits de la longue expérience qu'il a acquise dans l'étude de ces installations. Cette communication abonde en chiffres et en résultats pratiques ; elle se distingue par une parfaite précision et une grande netteté dans les conclusions.

Digitized by Google

Nous possédons à Liége une maison qui s'est fait une spécialité de la construction des ascenseurs électriques. M. Julin la dirige et nul mieux que lui ne pouvait nous entretenir de la technique de ces appareils, des multiples conditions auxquelles ils doivent satisfaire tant au point de vue électrique qu'à celui du mécanisme. Après nous avoir exposé les principes, M. Julin en a montré l'application à l'appareillage Jaspar construit dans ses établissements.

L'industrie des lampes à incandescence, après avoir traversé une longue crise, s'est largement développée depuis quelques années à la faveur de l'emploi du filament ou du fil métallique. Dans ces conditions nouvelles, cette industrie a pu renaître dans notre pays et M. Bayet, un des pionniers de cette résurrection, a tenu à nous entretenir des procédés modernes de cette fabrication spéciale.

Parmi les travaux d'ordre scientifique qui nous ont été présentés, je citerai le mémoire si lumineux de M. Colard sur la relation entre le champ électrostatique et le champ électromagnétique d'un système de conducteurs parallèles, de longueur indéfinie.

M. Markovitch, traitant de l'inductance et de la chute de tension dans les lignes aériennes à courants triphasés, nous a produit une étude théorique parfaitement rigoureuse, à ces points de vue, de la ligne triphasée équilatérale et de la ligne asymétrique ; il a examiné encore le cas où deux lignes de l'espèce cheminent côte à côte et, enfin, le cas de la traction par courants triphasés, le rail formant le 3e conducteur.

Les diverses dispositions d'enroulement des transformateurs triphasés ont fait l'objet d'une intéressante communication de M. Willame, dans laquelle l'auteur met clairement en lumière les avantages et les inconvénients des différentes dispositions employées.

Digitized by Google

M. Chauvin nous a exposé la méthode qu'il a imaginée pour prédéterminer la chute de tension des alternateurs. Après nous avoir donné la théorie de son procédé, l'auteur nous en a montré le haut degré de précision.

M. Gaillard nous a présenté un travail très complet sur les remèdes à l'incrustation des chaudières à vapeur ; c'est un sujet qui appelle toute l'attention de nos camarades qui ont à établir ou à diriger des centrales ; ils y trouveront une abondante documentation et aussi des considérations critiques fort utiles.

Ce n'est pas seulement dans ce domaine un peu étranger à l'électrotechnique que l'ingénieur électricien doit poursuivre son étude et étendre son expérience. Parfois même les circonstances lui font un devoir de donner sans hésitation les premiers soins aux électrocutés. Chacun de nous lira avec intérêt la description que M. Uytborck nous a donnée de la méthode de Schaeffer sur la manière de pratiquer la respiration artificielle.

Vous savez tous qu'une Conférence internationale s'est tenue l'année dernière à Paris, aux fins d'unifier l'Heure. Cette question, si importante pour le télégraphiste, a donné lieu à des travaux dont M. Steels nous a rendu compte.

Conformément au règlement de la fondation Montefiore, notre *Bulletin* a publié cette année deux mémoires couronnés au concours de 1911, à savoir :

L'étude de M. Marius Latour sur la commutation dans les machines à courants continus et à courants alternatifs, et

Les recherches sur les machines à champ tournant à collecteur de M. Rüdenberg.

Enfin, M. Giles, dont la compétence en matière de protection des réseaux est bien connue, nous a fait une fort intéressante conférence sur les accidents d'exploitation dans les réseaux électriques.

Digitized by Google

Après avoir terminé l'énumération de nos travaux et m'être réjoui de leur importance, je ne puis me défendre d'exprimer un regret : c'est celui de ne pas voir assez, à côté de ces études largement développées, quelques communications plus modestes, se rapportant à l'observation d'un fait, à l'apparition d'une nouveauté, ou à quelques réflexions suggérées par la pratique de nos camarades, qui formeraient en quelque sorte le lever de rideau de nos séances et en augmenteraient l'intérêt par la diversité. Il ne faut pas, en effet, que s'accrédite ici l'idée que seuls les travaux longuement élaborés, dans lesquels une question est considérée sous tous ses aspects, sont dignes de s'inscrire à nos ordres du jour.

C'est un agréable devoir pour moi de vous dire combien nous est précieuse la collaboration de notre secrétaire de la rédaction, M. Küntziger. J'espère que de nouveaux arrangements pris avec notre imprimeur allègeront sa tâche vraiment trop ardue de faire paraître, en leur temps, nos publications. A la vérité, je dois le dire, cet espoir serait vain, si nos conférenciers n'apportaient pas, à remettre leurs manuscrits, toute la célérité désirable et, notamment, s'ils ne respectaient pas les délais prévus par nos règlements.

(*Applaudissements.*)

M. J. Libert, *vice-président*, au fauteuil.

M. H. Chauvin, *président*, prononce son discours inaugural, dont le texte sera publié ultérieurement ainsi que le compte-rendu de la discussion qui suivit sa communication technique. Cette dernière, très applaudie, traite des Réseaux compensateurs et du rôle amortisseur des stations centrales hydrauliques à grandes réserves d'eau.

M. J. Libert, *vice-président*, se fait l'interprête de l'assemblée en félicitant et remerciant l'orateur.

La séance est levée à 13 heures.

Digitized by Google

SÉANCE DU 8 FÉVRIER 1913.

M. J. Libert, *vice-président*, au fauteuil.

Ont signé la liste de présence : MM. Botvinnik ; Brouck ; Calmeau ; Can ; Chauvin ; de Bardzki ; De Bast ; Fontaine, F. ; Garlinski ; Gerard, A. ; Gerard, Eric ; Gosseries ; Henrion ; Julin ; Kogan ; Koulikoff ; Küntziger ; Lavison ; Libert ; Lubienski ; Mancinforte ; Marinucci ; Martin, G. ; Mourachow ; Verdurand ; Verlinden ; Warszwowski.

M. J. Libert dépose sur le bureau les ouvrages suivants offerts à l'Association :

Transport de force. Calculs techniques et économiques des lignes de transport et de distribution d'énergie électrique, par C. Le Roy, 2 vol. ; A. Herman et fils, Paris, 1912.

Théorie et calcul des phénomènes électriques de transition et des oscillations, par C. P. Steinmetz (traduit de l'anglais par P. Bunet) ; H. Dunod et E. Pinat, Paris, 1912.

Réception des signaux radiotélégraphiques transmis par la tour Eiffel. Publication du Bureau des Longitudes ; Gauthier-Villars, Paris, 1912.

La parole est donnée à **M. G. Martin** pour sa communication.

Digitized by Google

621.313.21

Les Moteurs Latour
Série-compensé et shunt-compensé.

Comme on le sait, les moteurs à collecteurs à courant monophasé se divisent en deux groupes : les moteurs à caractéristique série et les moteurs à vitesse constante ou shunt.

Les moteurs à caractéristique série comprennent :

1° les moteurs série avec ou sans enroulement de compensation ;

2° les moteurs à répulsion ;

3° les moteurs Latour ou Winter-Eichberg.

Le seul moteur shunt existant est le moteur Latour shunt-compensé.

La théorie des moteurs série et des moteurs à répulsion vous a été exposée ici par M. Fesch, en 1908. Nous allons traiter celle des moteurs Latour série et shunt.

Nous parlerons d'abord de l'historique de ces moteurs et de leurs applications, puis nous ferons quelques considérations sur le couple dans les machines électriques en général. Nous aborderons ensuite la théorie des moteurs Latour série, celle des moteurs Latour shunt, et nous terminerons en disant un mot des essais de ces moteurs.

I. Historique et usages des moteurs Latour.

Dès 1900 les docteurs Friederich Eichberg, de Berlin, et Winter, de Vienne, étudièrent les moteurs qui portent leurs noms. En 1902, la Société l'Union, de Berlin, en construisit les premiers modèles.

Digitized by Google

Leur entrée dans la pratique date des travaux de M. Marius Latour, qui les étudia de son côté et fit construire, en 1903, son premier modèle par la Société Postel Vinay. M. Latour signala, le premier, les nombreuses variantes dont sont susceptibles ces moteurs, et leurs intéressantes propriétés.

La théorie élémentaire des moteurs Latour série a été donnée, pour la première fois, par M. Latour, dans sa communication à la Société internationale des Electriciens, le 3 juin 1903. Parmi les travaux les plus importants publiés par la suite sur les moteurs Latour série, citons :

1° L'étude publiée par M. Latour dans l'*Elektrotechnische Zeitschrift*, en 1903 ;

2° La « théorie du moteur série compensé monophasé », par M. Bethenod. (*Eclairage Electrique*, 1904, T. XLI et XLII) ;

3° L' « Etude théorique sur les moteurs monophasés à collecteur », par M. Lehmann. (*Eclairage Electrique*, 1904, T. XL). Cette étude donne, pour la première fois, le diagramme du moteur Latour série ;

4° « Les Moteurs monophasés à collecteur, Moteur Latour », par Jacquin. (*Revue Electrique*, 1906, T. V. p. 327) ;

5° « Les moteurs monophasés et polyphasés à collecteur », par M. E. Perdu. (*Technique Moderne*, 1910) ;

6° Enfin, les nombreux articles publiés par M. Latour dans différentes revues françaises et étrangères, en particulier dans *l'Eclairage Electrique* (T. XXIX, XXXVIII, XXXIX, XLI).

Parlons maintenant des applications du moteur Latour série. C'est, avant tout, un moteur de traction.

Vous connaissez les applications qui en ont été faites par la Société l'Union, de Berlin, notamment à Spindersfeld, Subaithal et au Borinage. La Compagnie du chemin de fer de Londres à Brighton l'a employé récemment pour ses locomotives.

Digitized by Google

Il faut cependant remarquer que, pour la grosse traction, on préfère encore actuellement le moteur série ordinaire à enroulement de compensation. Les nombreuses locomotives équipées en Amérique par la Westinghouse, les locomotives construites en ce moment par les Ateliers de Jeumont, pour la Compagnie du Midi, sont de ce dernier système.

Le moteur Latour shunt est le seul moteur à collecteur monophasé dont la vitesse soit constante (1). Ses propriétés le rapprochent du moteur d'induction monophasé, mais il possède sur celui-ci les avantages suivants :

1° Couple au démarrage énergique, égal à environ trois fois le couple normal ;

2° Capacité de surcharge plus élevée, sans décrochage ;

3° Meilleur cos φ, surtout à forte charge ;

Comme lui, il peut fonctionner en génératrice asynchrone.

Cette dernière propriété, jointe à la première, fait du moteur Latour shunt le moteur idéal pour ascenseurs et appareils de levage. Il est aussi tout indiqué pour la commande des pompes centrifuges, machines-outils, etc. Ses avantages énormes sur le moteur d'induction sont tels qu'il pourrait bien arriver à remplacer tous les systèmes de moteurs d'induction monophasés, dont on connaît les difficultés de démarrage.

Les études théoriques les plus importantes publiées sur ce moteur sont :

1° « Notes sur le moteur shunt compensé monophasé », par Bethenod. (*Eclairage Electrique*, 1905, T. XLII, XLIII) ;

2° « Le moteur shunt compensé monophasé », par Bethenod. (*Eclairage Electrique*, 1907, T. L, LI, LII) ;

(1) En exceptant le moteur Déri, plus compliqué, construit par la maison Brown-Boveri.

Digitized by Google

3° « Propriétés des rotors à collecteur », par Marius Latour. (*Eclairage Electrique*, 1907, T. L).

II. Couple dans les machines électriques.

Les remarques suivantes paraîtront évidentes. Nous croyons cependant utile de les exposer, car leur oubli a été cause d'erreurs fréquentes.

Dans toute machine électrique le couple est produit par l'action mutuelle de deux champs magnétiques :

1° Le champ résultant produit par le stator ;

2° Le champ résultant produit par le rotor.

(Ceci n'est pas tout à fait exact dans les machines à pôles saillants, où la dissymétrie des masses polaires par rapport au champ rotorique peut produire un couple, d'ailleurs toujours faible).

Les champs statorique et rotorique, en se composant, produisent un champ distordu.

En se représentant les lignes d'induction magnétique d'après la conception de Faraday, comme des fils élastiques tendus, on voit que cette distorsion est cause du couple. Sans distorsion, pas de couple.

Nous avons dit que le couple est dû, dans toute machine, à l'action mutuelle de deux champs magnétiques. Il faut y ajouter une remarque : ces deux champs sont dus eux-mêmes à des courants, donc les couples seront appliqués aux conducteurs statoriques et rotoriques et non au fer de la machine.

Une machine électrique est donc, schématiquement, l'ensemble de deux conducteurs, l'un fixe, l'autre mobile, dont l'action mutuelle produit le couple. Le fer joue un rôle passif. Il ne sert que de conducteur pour le flux magnétique.

Nous pouvons dire encore, pour une machine quel-

Digitized by Google

conque : *le couple est dû à l'action du champ statorique sur le courant rotorique* (l'inverse ne serait pas exact dans une dynamo à pôles saillants.)

Ou encore : *le couple est dû à l'action du champ résultant sur le courant rotorique.*

III. Théorie du moteur Latour série.

Pour chacun des deux moteurs Latour, nous exposerons d'abord une théorie physique, puis une théorie mathématique donnant un diagramme. La théorique physique ne fournit que des résultats approchés, mais elle fait bien comprendre le fonctionnement du moteur.

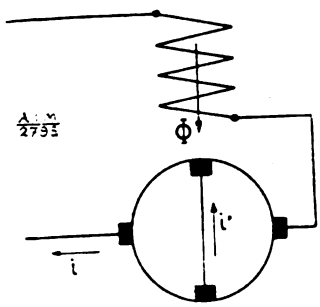


Fig. 1.

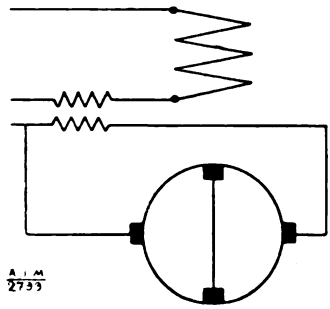


Fig. 2.

Le moteur Latour série est un moteur série, ordinaire, auquel on a ajouté, dans l'axe du stator, deux balais en court-circuit (fig. 1). Toutes les masses de fer sont feuilletées. Dans le moteur Winter Eichberg, le rotor est alimenté par l'intermédiaire d'un transformateur (fig. 2).

Bornons-nous à l'étude du moteur Latour proprement dit.

Digitized by Google

I. *Démarrage.* — Dans ce qui suit, nous négligerons les résistances ohmiques. La réluctance des circuits magnétiques n'est pas négligeable par suite de l'existence de l'entrefer.

Alimentons le moteur en courant alternatif, et voyons d'abord ce qui se passe au repos.

L'induit, par les balais verticaux, se comporte comme le secondaire d'un transformateur en court-circuit, dont le primaire est le stator.

Le courant induit de court-circuit annule donc à chaque instant le champ statorique. Le champ résultant vertical est nul à chaque instant. Soit i le courant d'alimentation, i'_1 le courant de court-circuit. Il existe :

1° Un champ statorique vertical, en phase avec i (fig. 3) ;

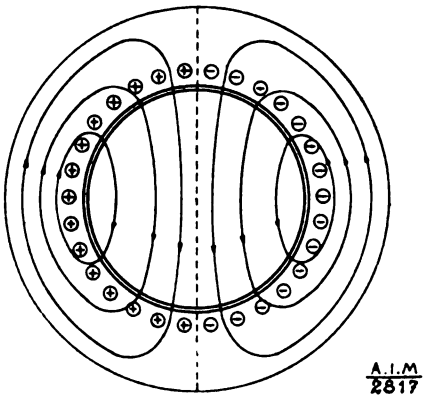


Fig. 3.

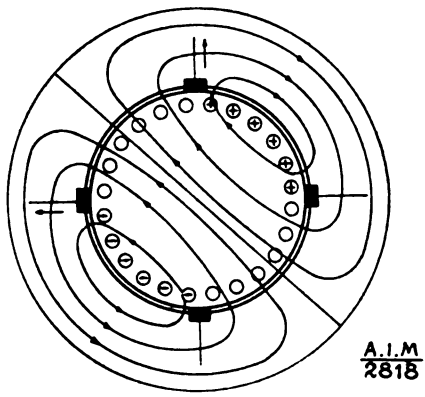


Fig. 4.

2° Un champ rotorique, ayant une composante horizontale, due à i, et une composante verticale, due à i'_1. Ce champ est représenté sur la fig. 4, en supposant $I = I'_1$.

L'action mutuelle de ces deux champs produit le couple. Le champ résultant est représenté sur la figure 5. Il est fortement distordu.

Digitized by Google

On voit, par symétrie, que le courant i'_1 est sans action sur le couple. *Le couple est donc à chaque instant le même que dans un moteur série identique, où l'intensité serait la même.*

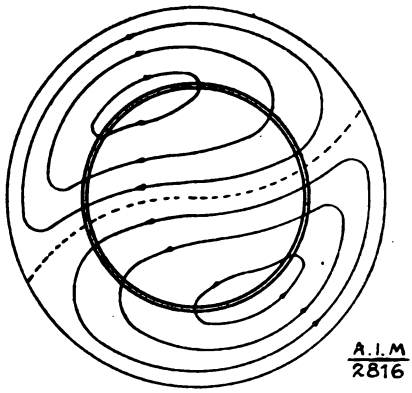


Fig. 5.

Nous avons dit que le champ résultant vertical était constamment nul. Le courant absorbé n'est donc limité que par la self de l'induit qu'il traverse horizontalement. Si l'on suppose les résistances ohmiques faibles, *le courant absorbé est entièrement déwatté.*

Ce résultat est d'ailleurs évident, car un système inductif sans résistance, au repos, ne peut absorber qu'un courant déwatté.

II. *Etude du moteur en marche.* — Laissons tourner le moteur.

La rotation de l'induit dans le champ horizontal créé par i va développer dans le court-circuit une force électromotrice dynamique en phase avec i. Celle-ci produira un courant dynamique de court-circuit i'_2, en retard d'un quart de période sur elle-même, donc aussi sur i. Ce courant i'_2 va se superposer à i'_1, courant statique, et va créer un

Digitized by Google

champ vertical Φ. Φ retarde d'un quart de période sur *i*. (fig. 6).

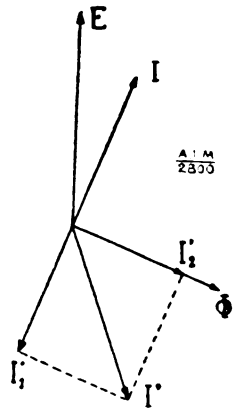


Fig. 6.

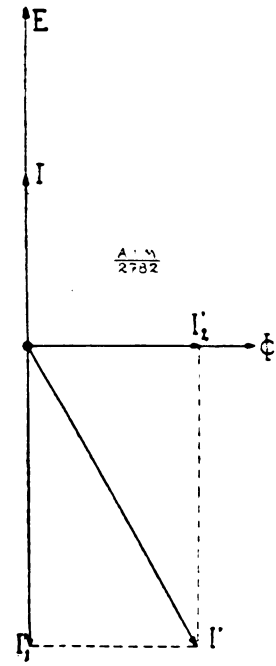


Fig. 7.

L'ensemble de ce champ Φ et du champ horizontal créé par le courant *i*, donne un *champ tournant, dans le sens du moteur, à la vitesse du synchronisme*. Ce champ est, en général, elliptique.

Le couple est physiquement identique à celui d'un moteur série alimenté par le même courant, car, comme au démarrage, le courant de court-circuit n'a aucune influence sur le couple. Cette propriété a souvent été méconnue.

Digitized by Google

Montrons qu'*au synchronisme, la commutation est parfaite et cos* $\varphi = 1$. (1).

Voyons d'abord à quelle condition le champ tournant elliptique devient circulaire.

Soit Li le flux total du champ horizontal crée par i dans l'induit, L étant un coefficient constant.

La force électromotrice dynamique de court-circuit est nN Li.

Le courant produit, i'_2, crée un champ de flux Li'_2 et embrasse un flux $\frac{1}{2\pi}$ N Li'_2. (2)

i'_2 est défini par l'égalité : $-\frac{1}{2\pi}\frac{d}{dt}(\mathrm{N\,L}i'_2) = n\mathrm{N\,L}i$

d'où, en passant aux valeurs efficaces : $\omega\, I'_2 = n\, I$

ω étant la fréquence.

Pour que le champ elliptique devienne circulaire, il faut que $I = I'_2$ c'est-à-dire : $\omega = n$.

Cette vitesse est le *synchronisme. Le rotor tourne alors avec le champ résultant, sans subir aucun déplacement relatif par rapport à lui.*

La commutation est parfaite.

Montrons que cos $\varphi = 1$.

Toute la chute de tension du courant i dans le moteur se produit dans le stator. Elle est due à la composante verticale Φ du flux.

Donc : $E = \nu \frac{d\Phi}{dt}$ · Φ retarde d'un quart de période sur E (fig. 7). De même i'_2 qui produit Φ.

Nous savons d'ailleurs que i'_2 retarde d'un quart de période sur i. Donc i est en phase avec E. — C. Q. F. D.

Nous avons cru intéressant, pour achever de nous

(1) La démonstration de ces deux propriétés capitales est due à M. Latour. Voir *Bulletin de la Société Internationale des Electriciens*, 1903.

(2) Voir appendice III.

Digitized by Google

représenter le fonctionnement physique du moteur, de chercher ce qui s'y passe au point de vue des échanges d'énergie.

Considérons d'abord, non pas le moteur série, mais un simple rotor à collecteur placé dans une carcasse de fer (fig. 8).

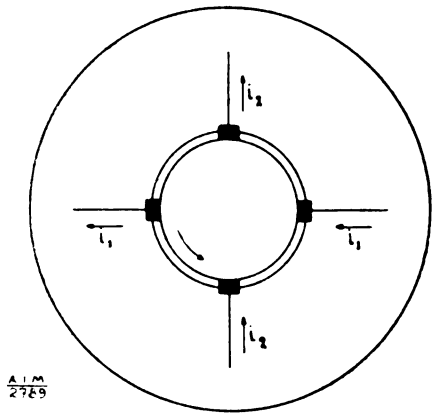


Fig. 8.

Au moyen de 4 balais, faisons-le traverser par deux courants continus i_1 i_2. Faisons tourner cet induit au moyen d'un moteur quelconque. Il n'y a pas de stator, donc pas de couple. Ceci est d'ailleurs évident, car un conducteur rigide ne peut avoir d'action sur lui-même.

L'induit tourne dans le champ vertical créé par i_2. Si le sens de rotation est le sens indiqué, le circuit horizontal sera soumis à une force électromotrice dynamique dans le sens de i_1. De même le circuit vertical à une force électromotrice opposée à i_2. *Il y aura échange d'énergie électrique entre les sources produisant les courants i_1 i_2, sans transformation d'énergie électrique en énergie mécanique.*

Considérons maintenant le moteur Latour série au synchronisme. Le champ tournant est circulaire. La

Digitized by Google

chute de tension du courant *i* se produit tout entière dans le stator. Donc *toute l'énergie empruntée par le moteur au réseau est perdue par le courant d'alimentation, à son passage dans le stator.* Cette première proposition a déjà été énoncée par M. Latour.

Cherchons ce que devient cette énergie. Le stator est le primaire d'un transformateur. *Il transmet l'énergie reçue au secondaire de ce transformateur, c'est-à-dire au courant de court-circuit. Celui-ci, grâce à la rotation de l'induit et d'après la remarque précédente, la transmet au courant traversant horizontalement le rotor. Ce dernier, par son action sur le champ statorique, produit le couple, et son déplacement dans ce même champ produit la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique.*

Pour terminer cette étude physique, indiquons la manière dont M. Marius Latour a été amené à la conception de son moteur (1).

Imaginons un moteur série ordinaire dont le stator serait bobiné comme le rotor. On peut réaliser d'une manière simple la compensation de la réaction d'induit au moyen d'un enroulement statorique fermé sur lui-même, d'axe normal à celui de l'inducteur. Il n'y a même pas besoin d'un nouvel enroulement. Pour réaliser cet enroulement fermé sur lui-même, il suffit de mettre en court-circuit, par un fil, les deux points de l'enroulement statorique voisins des balais. On a le schéma 9. Intervertissons les rôles du stator et du rotor. Nous aurons précisément le moteur Latour série.

D'après cette conception du moteur, le couple est évidemment identique à celui d'un moteur série.

Signalons quelques variantes du moteur Latour série (2):

(1) *Bulletin de la Société internationale des électriciens*, 1903.
(2) Voir Jacquin, article cité. *Revue Electrique*. T. V, p. 329.

Digitized by Google

1° Le moteur Latour à 2 paires de balais de court-circuit (fig. 10). On pourrait aussi créer des moteurs à 4, 6 paires de balais de court-circuit.

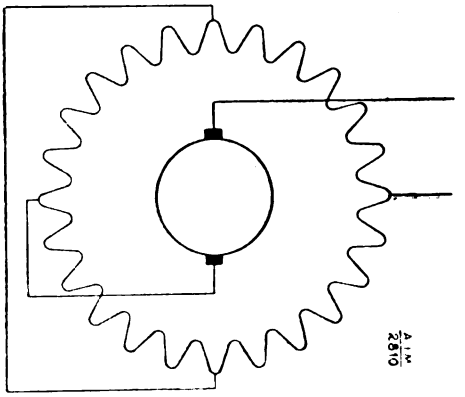


Fig. 9.

2° Le moteur Latour à 2 paires de balais de court-circuit, et alimentation par ces balais (fig. 11). Cette disposition améliore la commutation au démarrage.

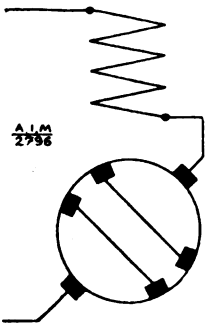


Fig. 10.

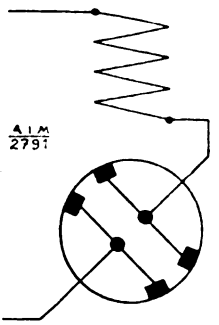


Fig. 11.

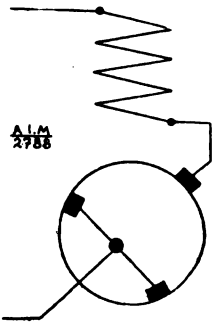


Fig. 12.

3° Le moteur Arnold à 3 balais (fig. 12).

Digitized by Google

Diagramme.

Négligeons la dispersion et les chutes ohmiques. Pour simplifier les notations, supposons le moteur bipolaire. Prenons un sens positif sur le circuit i. Nous compterons positivement les flux, force électromotrice et intensités dans les sens correspondants, indiqués sur la figure 1.

Soit Φ la composante verticale du flux dans l'espace, Φ_e sa valeur efficace.

ν le nombre de spires du stator.

i' le courant total de court-circuit.

Les forces électromotrices dynamiques sont $-n\,N\,\Phi$ dans le circuit i, et $n N.L i$ dans le circuit i'.

Les équations des deux courants sont :

$$\begin{cases} E - \nu \dfrac{d\Phi}{dt} - \dfrac{1}{2\pi} N\,L \dfrac{di}{dt} - n\,N\,\Phi = 0 & (1) \\ -\dfrac{1}{2\pi} N \dfrac{d\Phi}{dt} + n\,N.L\,i = 0 & (2) \end{cases}$$

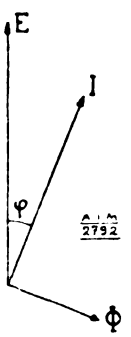


Fig. 13.

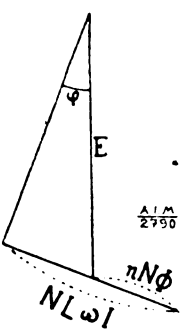


Fig. 14.

D'après l'équation (2) le vecteur représentant Φ est décalé de $\pi/2$ en arrière du vecteur I (fig. 13). Leurs longueurs sont liées par la relation :

$$\omega\,\Phi_e = n\,L\,I \qquad (3)$$

Digitized by Google

Soit φ l'angle des vecteurs E et I. L'équation (1), traduite géométriquement, donne la figure 14. Par projections, nous en tirons deux équations algébriques :

$$\begin{cases} E = 2\pi\nu\omega\Phi_c \cos\varphi + (L\omega I - n\Phi_e) N \sin\varphi \\ 2\pi\nu\omega\Phi_e \sin\varphi = (L\omega I - n\Phi_e) N \cos\varphi \end{cases}$$

d'où nous tirons I sin φ et I cos φ, en tenant compte de (3).

Posons :

$$a = N L \left(\omega - \frac{n^2}{\omega}\right)$$

$$b = 2\pi\nu L n$$

Il vient :

$$I \sin\varphi = \frac{a E}{a^2 + b^2}$$

$$I \cos\varphi = \frac{b E}{a^2 + b^2}$$

$a^2 + b^2$ est un polynôme du 4e degré en n et n'a pas de racines réelles.

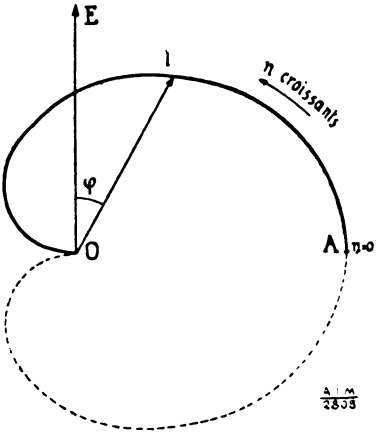


Fig. 15.

Digitized by Google

Etudions la courbe décrite par l'extrémité de I quand n varie. Elle n'a pas de points réels à l'infini. Elle est symétrique par rapport à l'horizontale du point O (fig. 15).

Pour $n = o$ (démarrage) l'extrémité de I est en A. Nous retrouvons le résultat déjà obtenu par des considérations physiques, et d'ailleurs évidentes. Quand n croît de o à l'infini, l'extrémité de I décrit la branche de courbe indiquée sur la figure 15.

I est en phase avec E à la vitesse n qui annule I sin φ, c'est-à-dire a, soit $n = \omega$. C'est le synchronisme et nous retrouvons encore le résultat obtenu dans l'étude physique.

Comme nous l'avons vu, le couple est à chaque instant le même que celui d'un moteur série identique alimenté par le même courant. Le couple et l'intensité sont maxima au démarrage et varient comme l'indiquent les courbes de la figure 16, à asymptote horizontale.

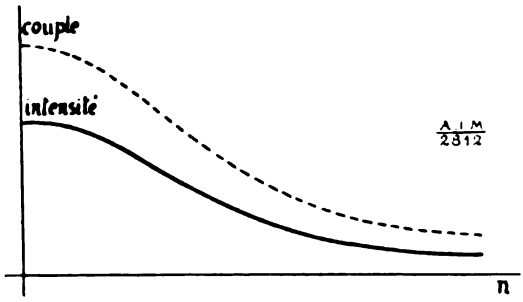


Fig. 16.

Nous avons supposé jusqu'ici les balais de court-circuit calés dans l'axe du stator et les balais d'alimentation suivant la normale. On peut modifier le régime de marche du moteur en décalant ensemble les 4 balais : *on peut ainsi régler la vitesse et cos φ pour une charge donnée.* Le diagramme de fonctionnement, dans ce cas, serait celui

Digitized by Google

de la figure 17 (1). Le couple et l'intensité passent alors

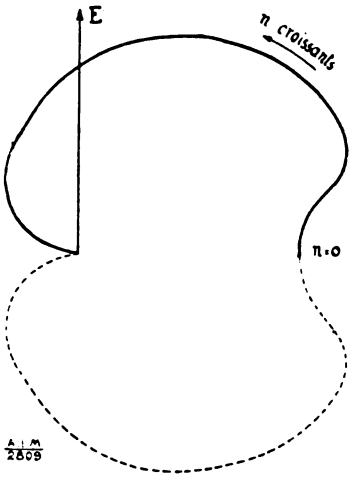


Fig. 17.

par un maximum entre le démarrage et le synchronisme suivant les courbes de la figure 18.

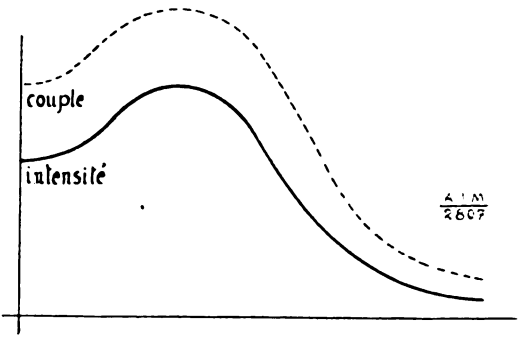


Fig. 18.

(1) Voir les études citées de MM. Lehmann et Perdu. Les courbes des figures 15 et 17 y sont données.

Digitized by Google

Le décalage des balais a surtout un intérêt théorique car le moteur Latour série est un moteur de traction et vous savez que des difficultés d'ordre mécanique empêchent le décalage des balais dans les moteurs de traction.

Dans le moteur à balais décalés, le couple est évidemment la somme algébrique des couples d'un moteur série et d'un moteur à répulsion identiques au moteur considéré.

IV. Moteur Latour shunt compensé.

Dans ce moteur, le stator et le rotor sont alimentés séparément par des courants dérivés sur le réseau.

Le stator est soumis à la tension totale E du réseau, et le rotor à une tension réduite *e*, en phase E, au moyen d'un transformateur (fig. 19).

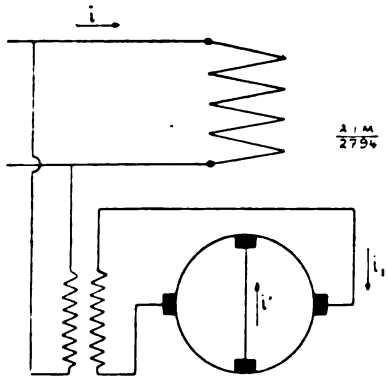


Fig. 19.

Souvent ce transformateur est un auto-transformateur constitué par le stator même du moteur (fig. 20 et 20*bis*). [1]

[1] Ces deux figures sont théoriquement équivalentes mais seule la figure 20*bis* assure une bonne utilisation du cuivre du stator.

Digitized by Google

Nous négligerons encore les résistances ohmiques, mais non pas la réluctance des circuits magnétiques.

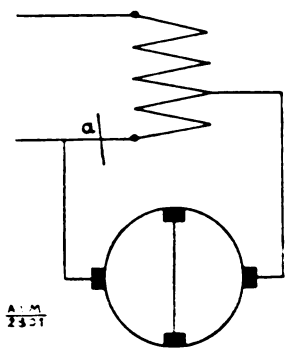


Fig. 20.

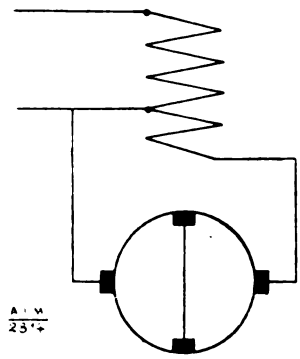


Fig. 20*bis*.

I. *Démarrage.*

Le rotor, par ses balais court-circuités, se comporte comme le secondaire d'un transformateur dont le primaire est le stator. Le courant de court-circuit annule donc la self du stator. Dans le moteur série le courant d'alimentation était limité par la self du rotor, qu'il traversait. Il n'en est plus de même ici et le courant statorique atteindra une valeur dangereuse ; le courant de court-circuit aussi. *Le démarrage est pratiquement impossible.* On devra faire démarrer le moteur soit en moteur à répulsion, en décalant les 4 balais, soit en moteur Latour série, dans le cas de la figure 20, en ouvrant un interrupteur placé en *a*. Ce dernier dispositif est le plus généralement employé. L'interrupteur est un conjoncteur centrifuge.

II. *Etude du moteur en marche.*

Soient : i le courant dans le stator.

i_1 le courant traversant horizontalement le rotor.

Digitized by Google

N le nombre de fils du rotor.

ν le nombre de spires du stator.

ω la fréquence, ou, si l'on veut, le nombre de tours par seconde du moteur bipolaire au synchronisme.

n le nombre de tours par seconde.

L'étude physique du moteur shunt est analogue à celle du moteur série : quel que soit le courant statorique, il existe à chaque instant un courant statique de court-circuit, i'_1, annulant le champ statorique. A ce courant statique i'_1 vient se superposer un courant dynamique de court-circuit i'_2, dû à la rotation du rotor dans le champ horizontal Li_1. Comme dans le moteur série, le courant dynamique i'_2 est en retard d'un quart de période sur i_1, et leurs intensités efficaces sont liées par la relation : $\omega I'_2 = n I_1$. *Ces deux courants produisent un champ tournant elliptique, devenant circulaire au synchronisme.*

La commutation est parfaite au synchronisme, car les spires de l'induit ne subissent aucun déplacement par rapport au champ résultant. On a donc intérêt à faire de cette vitesse la vitesse normale du moteur. Supposons cette condition réalisée. L'induit n'est alors soumis à aucune force électromotrice d'induction. La tension entre les balais horizontaux est très faible, égale à la chute ohmique dans le rotor.

Le courant I_1 est donc déterminé uniquement par la tension e et la résistance ohmique du rotor, ou, en d'autres termes, *la tension e est employée à vaincre la résistance ohmique du rotor.*

Supposons très faible cette résistance ohmique. Alors e doit l'être aussi, pour que la marche synchrone soit possible. Nous changeons infiniment peu le moteur en supposant $e = 0$, c'est-à-dire en court-circuitant les balais horizontaux. Nous avons le moteur de la figure 21. On voit sous cette forme que *le moteur est un véritable moteur*

Digitized by Google

d'induction. Il marche à vide au synchronisme. En charge, il glisse dans le champ tournant. Au-dessus du synchronisme il marche en génératrice asynchrone.

Il ne faudrait pas déduire de ce raisonnement que le moteur de la figure 21 est peu différent du moteur Latour shunt, car, dans le moteur limite auquel nous sommes arrivés, nous admettons l'existence d'une force électromotrice extérieure e, infiniment petite il est vrai, mais qui suffit pourtant à maintenir le courant I_1, et par suite à maintenir un champ tournant circulaire.

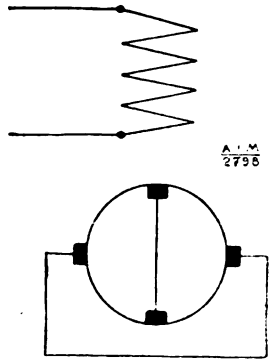


Fig. 21.

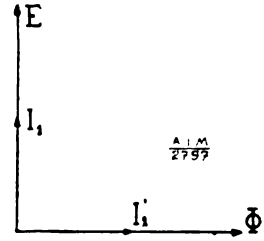


Fig. 22.

Nous nous proposons maintenant de montrer que :

1° Le courant I'_2 est constant en grandeur et direction, et en retard de $\pi/2$ sur E.

2° Le courant I_1 est sensiblement constant et en phase avec E.

En effet : la chute de tension dans le stator est due seulement à la variation du champ vertical $\Phi = Li'_2$. L'équation du courant dans le stator est donc :

$$E - \nu \frac{d(Li'_2)}{dt} = 0.$$

Digitized by Google

D'après cette équation, I'_2 est constant et en retard de 90° sur E (fig. 22).

Enfin I_1, nous l'avons vu, est en avance de $\pi/2$ sur I'_2 et a pour valeur efficace :

$$I_1 = \frac{\omega}{n} I'_2.$$

La vitesse varie peu, donc aussi I_1, et I_1 est en phase avec E.

On ne peut rien dire sur la direction de I sans faire d'hypothèses sur les ordres de grandeur relatifs des résistances et en particulier sur le rapport de *e* à la résistance du rotor.

Le couple, comme dans le moteur série, est dû à l'action du courant statorique sur le courant rotorique horizontal, c'est-à-dire à l'action mutuelle des courants I et I_1.

Si I est en phase avec E (ce qui est, en fait, à peu près réalisé), I est en phase avec I_1 et le couple est proportionnel au produit $I I_1$. Or I_1 est constant, donc les variations du couple sont produites seulement par les variations du courant statorique.

Le couple est sensiblement proportionnel au courant absorbé par le stator. A vide, ce courant est très faible.

Examinons le moteur au point de vue des échanges d'énergie, suivant les principes qui nous ont guidé dans l'étude du moteur Latour série.

L'énergie empruntée au réseau pour l'alimentation du rotor est très faible, puisque *e* est faible ; *e* est employé uniquement à vaincre la résistance ohmique du rotor, donc *cette énergie est dissipée intégralement en effet Joule dans le rotor.*

Comme dans le moteur série, l'*énergie venant du réseau est apportée au stator. Celui-ci la transmet (par le jeu du transformateur) au courant de court circuit. Celui-ci, par la rotation de l'induit, la transmet au courant i_1. Ce courant i_1*

Digitized by Google

produit le couple et la transformation de cette énergie en énergie mécanique.

Nous avons étudié jusqu'ici le moteur du type de la figure 19 seulement. Il est facile de voir que le moteur du type 20 diffère très peu. En effet, le rapport du nombre de spires statoriques alimentant le rotor au nombre total des spires statoriques est de 1/50 environ. Comme les courants I et I_1 sont de même ordre, le flux dû au passage de I_1 dans le stator est donc environ 2/100 seulement du flux statorique total. Il est tout à fait négligeable.

Diagramme.

La théorie physique précédente n'est qu'approchée, car nous avons négligé les pertes, fuites magnétiques, et la saturation.

Il est nécessaire d'avoir une théorie plus exacte, rendant compte, en outre, des phénomènes expérimentaux suivants :

1° le courant absorbé n'est pas, en général, en phase avec E.

Le courant déwatté absorbé varie d'un moteur à l'autre, et varie même, dans un moteur donné, presque à chaque instant.

2° Le courant d'alimentation du rotor croît légèrement avec la vitesse.

3° Propriété importante : si l'on introduit, en série avec les balais d'alimentation horizontaux, des résistances croissantes, le point représentatif du diagramme se déplace suivant la ligne *a b* (fig. 23). Le moteur absorbe un courant déwatté en arrière de la tension, croissant rapidement avec la résistance ajoutée.

4° Les harmoniques du réseau sont renforcés fortement et augmentent la vitesse du moteur.

Grâce à eux, le moteur peut tourner, à vide, à une

Digitized by Google

vitesse supérieure au synchronisme, et sa vitesse peut même augmenter avec la charge.

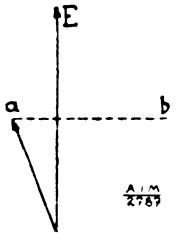


Fig. 23.

Comment établir un diagramme rendant compte de toutes ces propriétés?

La marche d'un moteur électrique, comme tout phénomène réel, est trop complexe pour être étudiée telle qu'elle est. Il faut négliger certains phénomènes. La difficulté, quand on établit un diagramme, est précisément de trouver les phénomènes importants, pour en tenir compte, et ceux que l'on peut négliger, de manière à obtenir une théorie rendant compte des faits observés. Suivant que l'on néglige tels ou tels éléments, on a différentes théories plus ou moins satisfaisantes. Ainsi, pour un transformateur, si on néglige les résistances ohmiques, on a le diagramme du cercle. Si on néglige la réluctance du noyau, on a le diagramme de Kapp. Le plus satisfaisant est le second.

Pour le moteur Latour shunt, il suffit de tenir compte des résistances des deux circuits fermés par le rotor pour expliquer les propriétés énoncées plus haut.

Conservons les notations précédentes et appelons :

i' le courant total de court-circuit ;

R_1 la résistance du circuit parcouru par le courant i_1 ;

R' la résistance du circuit parcouru par le courant i' ;

Digitized by Google

Φ la composante verticale du flux dans l'espace, Φ_e sa valeur efficace.

Les équations du courant dans les trois circuits $i\ i_1\ i'$ sont :

$$E - \nu \frac{d\Phi}{dt} = 0 \qquad (1)$$

$$e - \frac{1}{2\pi} N L \frac{d i_1}{dt} - N n \Phi = R_1 i_1 \qquad (2)$$

$$-\frac{1}{2\pi} N L \frac{d\Phi}{dt} + n N L i_1 = R' i' \qquad (3)$$

D'après la 1re équation, le vecteur représentant Φ_e est constant et en retard de $\pi/2$ sur E.

$$\Phi_e = \frac{E}{2\pi\nu\omega}.$$

Traduisons géométriquement les équations (2) et (3). Nous obtenons les figures 24 et 25.

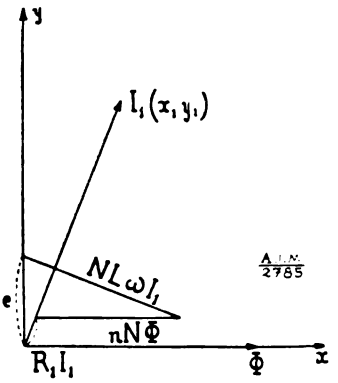


Fig. 24.

Soient $x_1\ y_1\ x'\ y'$ les projections des vecteurs $I_1\ I'$, sur les axes figurés.

Chacune des égalités géométriques (2) et (3) nous donne, par projection sur les deux axes x et y, deux équations.

Digitized by Google

J'écris les quatre équations obtenues :

$$R_1 x_1 = \omega L N y_1 - n N \Phi_e$$
$$R_1 y_1 = e - \omega L N x_1$$
$$R' x' = n N L x_1$$
$$R' y' = - \omega N \Phi_e + L N n y_1.$$

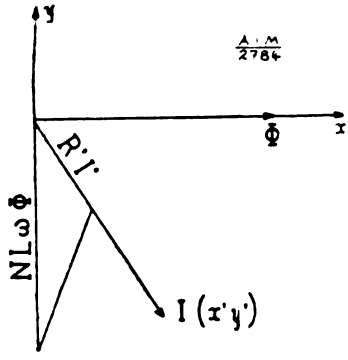


Fig. 25.

Ces équations déterminent $x_1\, y_1\, x'\, y'$ en fonction de R_1 et de n. Des deux premières nous tirons :

$$\begin{cases} x_1 = A\,(e\,\omega\,L - \Phi_e\,R_1\,n) \\ y_1 = \dfrac{e}{R_1}\,(1 - N\,L^2\,\omega^2\,A) + N\,L\,\omega\,A\,\Phi_e\,.\,n \end{cases}$$

en posant

$$A = \frac{N}{R_1^2 + \omega^2\,L^2\,N^2}.$$

Quand n varie de O à l'infini, le point $x_1\, y_1$ décrit une droite de cofficient angulaire $- N\,L\,\omega / R_1$.

Si R_1 est petit, ce coefficient est très grand. La droite est voisine de la verticale (fig. 26).

Si R_1 croît, la droite s'incline vers la gauche.

Digitized by Google

Cherchons le lieu du point $x' y'$. Nous avons :

$$R' x' = N L A (e \omega L - \Phi_e R_1 n) n$$

$$R' y' = - \omega N \Phi_e + L N \frac{e}{R_1} (1 - N L^2 \omega^2 A) n + L^2 N^2 \omega A \Phi_e n^2$$

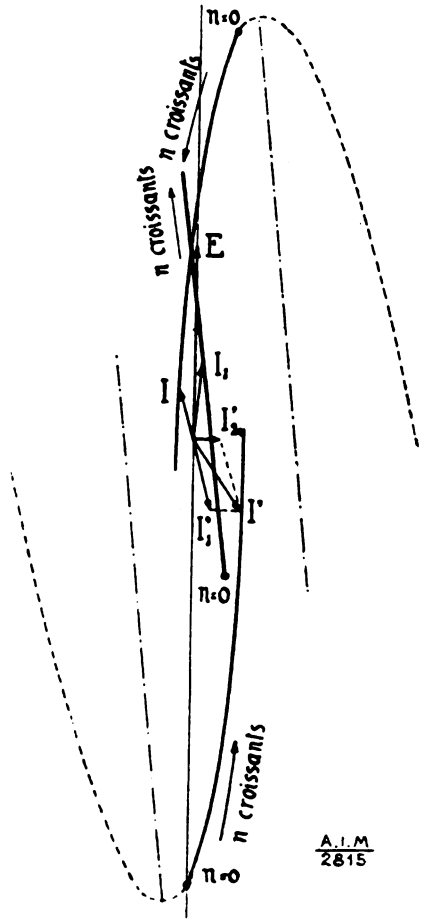


Fig. 26.

Digitized by Google

Quand n varie, le point $x' y'$ décrit une parabole. Son axe a pour coefficient angulaire le quotient des coefficients de n^2 dans les expressions de y' et de x', soit $- N L \omega / R_1$. *Il est parallèle à la droite décrite par le point* $x_1 y_1$.

La parabole est placée comme l'indique la figure 26.

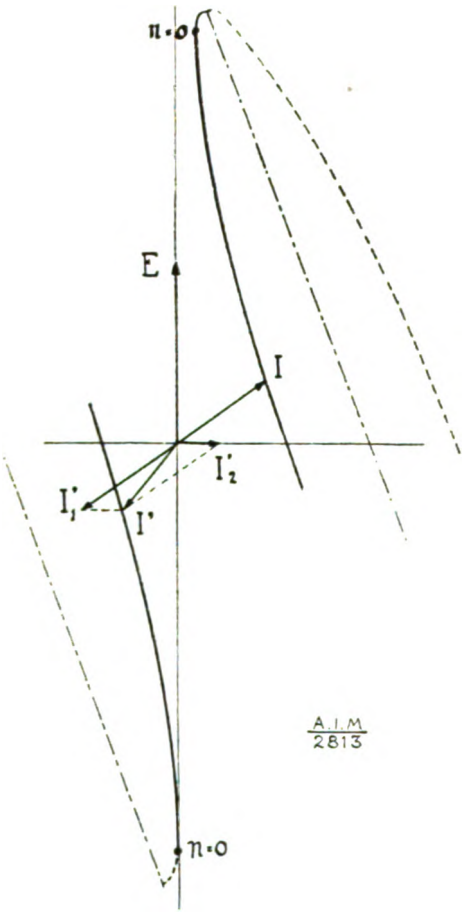


Fig. 27.

Digitized by Google

Le point correspondant au démarrage ($n = 0$) est sur l'axe des y, au-dessous de l'origine, et sa position est indépendante de R_1.

Si R_1 croît, la parabole s'incline vers la gauche, en pivotant autour du point correspondant au démarrage.

Cherchons maintenant quelle est la courbe décrite par l'extrémité du vecteur I. Le champ vertical résultant est produit par la somme des forces magnétomotrices dues aux courants i et i' ou, ce qui revient au même, par le seul courant i'_2. Le courant i est donc défini à chaque instant par l'égalité,

$$\frac{4\pi}{10}(\nu i + N i') = \frac{4\pi}{10} N i'_2 = \mathcal{R}\,\Phi.$$

$\mathcal{R}$ étant la reluctance du circuit magnétique vertical.

La valeur efficace de Φ, donc aussi de i'_2 est constante. $\mathcal{R}$ n'est pas négligeable, car alors il faudrait négliger les courants magnétisants, c'est-à-dire i'_2 et i_1.

Cette équation est représentée par la figure 28.

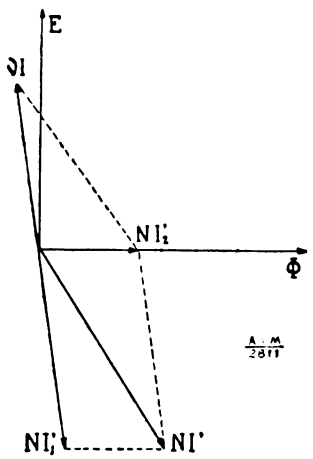


Fig. 28.

Digitized by Google

D'après cette figure, le lieu de l'extrémité du vecteur I s'obtient de la manière suivante : Je considère la parobole lieu de l'extrémité de N I'. Je lui imprime une translation horizontale, vers la gauche, de longueur N I'_2. J'en prends le symétrique par rapport à l'origine. J'ai la parabole lieu de l'extrémité de ν I. Elle est homothétique, dans le rapport ν, de la courbe lieu de l'extrémité de I. Cette courbe est donc une parabole.

Les axes des deux paraboles et la droite sont parallèles. Le point de la seconde, correspondant au démarrage, est fixe. Donc, *si R_1 croit à partir de O, les axes des deux paraboles s'inclinent vers la gauche, en partant de la position verticale.* (fig. 27).

Cherchons l'expression du couple.

Il est proportionnel, à chaque instant, au produit $i\,i_1$, soit C K $i\,i_1$. Le couple moyen pendant cette période est :

$$C = \frac{K}{T}\int_0^T i\,i_1\,dt \qquad T = \frac{2\pi}{\omega}$$

Soit α l'angle des vecteurs I I_1. Le couple est

$$C = K\,I\,I_1 \cos\alpha.$$

Voyons quelles conséquences on peut tirer de l'étude du diagramme :

1° Si R_1 est très faible, les deux paraboles sont très aplaties et leur axe presque vertical.

L'arc de parabole décrit par l'extrémité de I est voisin de l'origine, et à gauche celle-ci. Dans ce cas, *l'intensité est toujours en avance sur la tension et cos φ est d'autant plus voisin de 1 que la charge est plus forte.*

L'arc correspondant à la variation de vitesse entre la marche à vide et les surcharges admissibles est faible par rapport à l'ordonnée au courant, car celle-ci est de

Digitized by Google

l'ordre du courant de démarrage, lui-même énorme. Pour cette raison, le chemin parcouru par l'extrémité de I sur la parabole est sensiblement proportionnel à la variation de n. *La puissance absorbée varie proportionnellement au glissement. L'intensité et le couple varient sensiblement suivant la même loi.* Les arcs décrits par les extrémités de I et I' se confondent presque avec des droites.

2° Le courant d'alimentation du rotor croît légèrement avec la vitesse.

3° Décrochage.

A vide, le couple tend vers o, non parce que I et I' tendent vers o, mais parce que α tend vers $\pi/2$.

Si le moteur ralentit, α passe une seconde fois par la valeur $\pi/2$ et le couple s'annule. Le couple passe entre ces deux valeurs par un maximum : c'est le couple critique.

4° Si l'extrémité I descend au-dessous de l'axe des x, le moteur marche en génératrice asynchrone.

5° Influence de R_1.

Si R_1 croît, les axes des deux paraboles s'inclinent vers la gauche en pivotant autour du point correspondant au démarrage (fig. 27). *Le courant déwatté absorbé par le moteur, à puissance constante, croît rapidement, et l'angle φ décroît jusqu'à o, puis croît rapidement après avoir changé de signe.*

Il suffit, en réalité, d'ajouter une très faible résistance en série avec le balais d'alimentation du rotor pour avoir un très mauvais cos φ. D'où l'importance d'avoir de bons contacts électriques.

Dans le cas où l'intensité est en avance sur la tension, on peut évidemment régler cos φ, pour l'amener à la valeur 1, en ajoutant une résistance en série avec les balais d'alimentation.

Digitized by Google

6°) Influence des harmoniques.

Pour un harmonique quelconque le moteur tourne à une vitesse bien inférieure au synchronisme, d'autant plus inférieure que l'ordre de l'harmonique est plus élevé.

Nous savons qu'un moteur marchant à une vitesse notablement inférieure au synchronisme (près du sommet de la parabole) absorbe une très grande intensité. *Le moteur renforce donc fortement l'intensité des harmoniques du réseau et cela d'autant plus que leur période est plus faible.*

C'est là une différence importante entre le moteur Latour shunt et le moteur d'induction. Dans le premier, l'intensité au démarrage serait infinie si les résistances ohmiques étaient nulles ; dans le second, la dispersion la limite à une valeur relativement faible. Le moteur Latour shunt renforce donc les harmoniques du réseau beaucoup plus que le moteur d'induction.

L'influence des harmoniques est telle que le *moteur peut marcher notablement au-dessus du synchronisme. Sa vitesse peut même augmenter avec la charge* au lieu de décroître. Le même moteur, alimenté par un courant à sinusoïde plus pure, fonctionne dans les conditions du diagramme.

7°) Influence des variations de R'.

Elles ont peu d'influence sur la marche du moteur.

En effet, l'équation (2) détermine I_1 indépendamment de R'. Si R' augmente, I' diminue proportionnellement en conservant la même direction (équation 3). De même pour I. Une augmentation de R' diminue la puissance pour une vitesse donnée, donc diminue la vitesse si la charge reste constante.

8°) On pourrait étudier d'une manière approchée l'influence des éléments dont nous n'avons pas tenu compte par la méthode suivante. Prenons, par exemple, l'influence

Digitized by Google

de la résistance R et des fuites du stator. L'équation du courant dans le stator est, en tenant compte de ces deux éléments :

$$E - \nu \frac{d\Phi}{dt} = l \frac{di}{dt} + R i$$

Elle est représentée géométriquement par la figure 29.

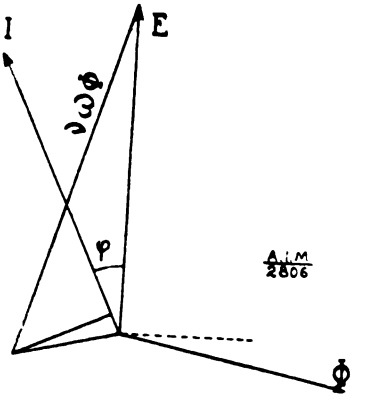


Fig. 29.

L'effet de la chute ohmique dans le stator est de décaler Φ d'un angle β en arrière de sa position dans le premier diagramme et d'augmenter sa valeur, dans le cas de la figure 29 (fuites grandes par rapport à la résistance ohmique et cos φ voisin de 1), de la diminuer si le point P était au-dessus de l'axe des *x*.

Le diagramme ne pourrait être construit en partant de ce nouveau vecteur Φ. On trouverait évidemment, à vitesse égale, un angle φ diminué et une intensité augmentée.

L'effet des fuites et de la chute ohmique primaires, dans le cas de la figure 29, est d'augmenter la vitesse pour une charge donnée.

Digitized by Google

Si on introduit une résistance en série avec le courant I on se place dans le cas contraire au cas de la figure et on diminue la vitesse.

Pour en finir avec le moteur shunt, signalons un deuxième procédé pour régler son cos φ : c'est d'alimenter le rotor à une tension e décalée par rapport à E, comme l'a indiqué M. Latour [1].

Résultats d'essais.

Les résultats suivants ont été obtenus aux ateliers de Jeumont sur de petits moteurs du type de la figure 20.

I. Moteur de 7 chevaux.

1° Variation de vitesse :

A vide $n = 1030$. A charge normale $n = 984$.

n décroît donc de 4,68 % quand on passe de la marche à vide à la charge normale.

Avec une surcharge de 68 %, $n = 948$. Donc n a diminué de 3,66 % depuis la charge normale.

2° Variations du courant d'alimentation du rotor I_1.

$I_1 = 60$ en charge normale et $I_1 = 64$ à très faible charge. Sa variation est donc de 6,66 %.

3° Influence d'une résistance en série avec I_1, sur le courant absorbé I. Avant l'introduction de cette résistance, $I = 55$ et est légèrement en avance sur la tension. Le vecteur $I - I_1$ est égal à 7 ampères. Avec la résistance $I = 75$, $\cos \varphi = 0,7$ et $I - I_1 = 53$. I est en arrière de la tension aux bornes.

4° Couple au démarrage, en moteur série. Il est égal à 2,6 fois le couple normal.

(1) Voir Bethenod : Le moteur shunt compensé monophasé. *Éclairage électrique*, 27 mai 1905, p. 290.

Digitized by Google

II. Moteur de 2 chevaux, 110 volts, 42 périodes, 1,200 tours.

Les résultats suivants ont été obtenus entre la marche à vide et une surcharge de 72 % au-dessus de la charge normale. ψ désigne l'angle du courant total du court circuit I' et de la tension aux bornes du moteur.

Toutes les intensités sont évaluées en ampères.

Points	Puissance absorbée	Tours par minute	I	Cos φ	I'	Cos ψ	I_1
1	2535	1100	23,5	0,98	65	0,965	28,4
2	1920	1170	18,8	0,928	49	0,92	20,4
3	1578	1180	15,5	0,925	39	0,895	30,9
4	1324	1185	14,5	0,83	33,3	0,85	31,6
5	1102	1195	12,6	0,86	29,4	0,835	32,9
6	884	1205	11,4	0,705	21,5	0,67	33,9
7	492	1205	8,6	0,52	17,6	0,49	35,7

L'angle de I_1 avec la tension aux bornes a été trouvé tellement faible qu'il n'a pas été possible de le mesurer avec précision.

V. Essais des moteurs Latour.

Nous parlerons d'abord de la mesure du rendement des moteurs Latour série.

Il n'est pas possible, en général, de séparer les pertes.

En effet les pertes dans le fer, au synchronisme, sont dues à un champ tournant suivi sans glissement par le rotor. Elles existent donc dans le stator seul.

On pourrait les mesurer de la manière suivante : creer un champ tournant dans le stator en l'alimentant

Digitized by Google

en diphasé si le moteur est à 4 ou à 8 pôles, et en triphasé s'il est à 6 ou 12 pôles. On mettrait en court circuit les 4 balais. Dans ces conditions, le rotor serait entraîné par le champ tournant comme dans un moteur asynchrone, et l'énergie absorbée par le stator serait la somme des pertes dans le fer du stator, et des pertes par frottements (en négligeant l'effet Joule).

Cette méthode, en réalité, n'est pas applicable, car le stator d'un moteur Latour présente deux bornes seulement, et on ne peut alimenter séparément ses différentes bobines.

La mesure du rendement revient à la mesure du couple, en charge normale. *Nous allons montrer que celle-ci peut se ramener à la mesure d'un couple de démarrage.* Cette remarque a un grand intérêt pratique, car la mesure d'un couple en charge, au frein de Prony par exemple, est difficile et peu précise, par suite de la difficulté de réglage et de l'échauffement du frein. La mesure d'un couple au démarrage, au contraire, se fait au moyen d'un frein de Prony calé sur la poulie du moteur. Elle est aussi facile et précise qu'une pesée effectuée au moyen d'une balance à fléau.

Nous parlerons du *couple électrique* seulement. Le couple efficace, égal à celui-ci, diminué du couple des frottements, s'en déduirait facilement, car le couple des frottements peut se mesurer, au démarrage, par le frein de Prony, et à vitesse normale, par un essai effectué en faisant tourner le moteur comme moteur à courant continu. (Il suffit, pour cela, de soulever les balais de court circuit).

Voyons donc comment il est possible de ramener la mesure du couple électrique normal à la mesure d'un couple électrique au démarrage.

Pour cela, étudions le champ résultant du moteur Latour série, à l'instant où l'intensité d'alimentation i est maxima.

Digitized by Google

A cet instant, l'intensité de court circuit i' est négative et égale à la valeur maxima de i'_1 (fig. 6).

Les champs inducteur, induit et résultant, sont alors représentés par les figures 3, 4 et 5 où l'on a supposé $I = I'_1$ pour simplifier (il suffit, pour réaliser cette condition, de donner au stator un nombre de spires convenables). Le champ résultant est fortement distordu.

Voyons ce qui se passe quand i décroît jusqu'à o. Quand $i = o$, c'est-à-dire un quart de période après l'instant où le champ est celui de la figure 5, i'_2 est maximum, donc le seul champ existant est le champ dû au courant de court circuit i'_2. Il n'y a ni couple ni distorsion.

Donc, pendant que i décroît de son maximum à o, le champ horizontal distordu de la figure 5 se transforme en un champ vertical sans distorsion, comme celui de la figure 3, en même temps que le couple décroît de sa valeur maxima à o.

Alimentons maintenant le moteur au repos, à voltage réduit, de manière à avoir l'intensité normale. Je dis que le couple électrique sera exactement égal au couple normal.

En effet, à l'instant où i est maximum, on a encore exactement les champs de la figure 5 et, par conséquent, exactement le même couple qu'en marche normale, même en tenant compte de la dispersion et de la saturation, mais sans tenir compte de l'entraînement du champ, en marche, par hystérésis. A l'instant où i est nul, il n'existe pas de champ magnétique, puisqu'il n'y a plus maintenant de courant i'_2. Entre ces deux instants, la variation des deux couples est sinusoïdale puisque le couple, à chaque instant, est le même que dans un moteur série.

Si l'on négligeait la saturation, toute la démonstration précédente serait inutile. Il suffirait de dire que le couple est celui d'un moteur série, donc est fonction de I seulement. Mais, par suite de la distorsion et de la saturation, cela ne serait pas évidemment exact.

Digitized by Google

La mesure du rendement des moteurs Latour shunt pourrait se faire d'une manière analogue. Le couple a pour valeur $C = K I I_1 \cos (I I_1)$.

On mesurerait $I I_1$ et $\cos (I I_1)$ en marche normale, et K par un essai au démarrage, en moteur série, à intensité I, donnant un couple $C' = K I^2$.

K est le même dans les deux cas, car I et I_1 sont sensiblement égaux et en phase, de sorte que les champs au démarrage et en marche sont sensiblement identiques. La saturation et la distorsion le sont donc aussi.

Pour les très petits moteurs il faudrait faire deux essais suivant les figures 30 et 31. (Voir *Revue électrique*, 27 septembre 1912.)

Pour le moteur shunt, on a les pertes avec une approximation suffisante en mesurant la puissance absorbée à vide et en tenant compte des pertes par effet Joule, faciles à calculer. En effet les champ tournant est alors le même qu'en charge. Les pertes dans le fer sont donc les mêmes. Les frottements sont aussi les mêmes, puisque la vitesse a peu changé. Les effets Joule seuls diffèrent, mais il est facile d'en tenir compte en les calculant. Il faut observer que les deux courants circulant dans le rotor sont superposés. L'effet Joule dans le rotor n'est donc pas la somme des effets Joule des deux courants I' et I_1. A vide, l'effet Joule dû à I_1 n'est pas négligeable. Tous les autres le sont.

Donnons maintenant quelques indications pratiques relatives aux essais. La première opération à faire est le calage des balais dans la position convenable. Pour cela, on alimente le stator seul. Grâce aux balais de court circuit, le moteur démarre en moteur à répulsion si ces balais ne sont pas dans la ligne neutre. On arrive rapidement, par tâtonnements, à les placer de manière à empêcher le démarrage. Il faut prendre garde de ne pas commettre une erreur d'un demi-pas polaire. Dans les

Digitized by Google

moteurs Latour shunt, on doit ensuite reconnaître celle des deux bornes *a b* (fig. 30) à relier au balai *d*. Il suffit

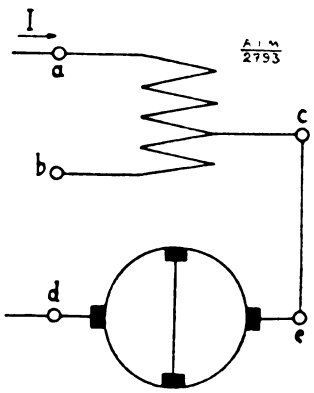


Fig. 30.

pour cela d'alimenter le stator à voltage réduit, et de mesurer les chutes de tension entre les bornes *a c* et *b c*.

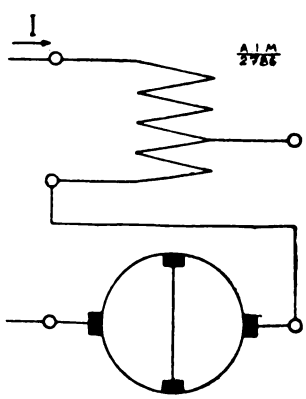


Fig. 31.

On peut ensuite construire par points les courbes caractéristiques du moteur, et mesurer le rendement et le couple comme nous l'avons dit.

Digitized by Google

Il est souvent utile de connaître le rapport du couple de démarrage au couple normal. La méthode suivante n'est qu'approchée, mais commode en raison de sa simplicité : On fait actionner par le moteur une dynamo à excitation maintenue constante. Le couple électrique de la dynamo est sensiblement proportionnel à l'intensité débitée par elle. On mesure celle-ci à charge normale. On met ensuite la dynamo en court circuit sur un ampèremètre et on alimente le moteur. Le groupe tourne très lentement, et le courant produit par la dynamo est à son intensité normale dans le rapport des couples cherchés.

L'essai d'un moteur Latour shunt doit être ordinairement accompagné du réglage du conjoncteur centrifuge. Celui-ci doit fonctionner très peu au-dessous de la vitesse normale, par exemple à 1180 t : m, si celle-là est de 1200. En effet, s'il agit trop tôt, le moteur peut n'être pas assez lancé, si la charge est forte, pour achever son démarrage en moteur shunt. Il décroche, repart en moteur série, et l'on a une suite indéfinie de «pompages». Si le conjoncteur agit trop tard, son action produit l'effet d'un coup de frein en ramenant brusquement le moteur à sa vitesse de régime. S'il fonctionnait beaucoup trop tard, le conjoncteur pourrait revenir, en vitesse normale, à sa position de repos, et l'on aurait une série de «pompages» comme dans le cas précédent.

Appendice I.

Approximation des théories précédentes.

Les théories précédentes sont seulement approchées, car elles reposent sur des hypothèses qui ne sont pas tout à fait exactes.

Les principales causes d'erreur sont les suivantes :

Digitized by Google

1° Nous avons admis que la force électromotrice de self-induction pour un courant traversant le rotor est $\omega N L i$. Cela n'est pas tout à fait exact (Appendice III), mais on l'admet d'habitude, comme le fait par exemple M. Latour dans ses conférences faites à l'Ecole supérieure d'Electricité.

En réalité le flux dû à un courant I traversant le rotor et embrassé par lui est

$$\frac{K}{2\pi} N L I \qquad (K < 1).$$

Alors le champ tournant des moteurs série et shunt est elliptique au synchronisme, au lieu d'être circulaire.

La commutation serait encore parfaite au synchronisme, pour les balais calés comme nous l'avons supposé, car une spire est commutée à l'instant où le flux qu'elle embrasse passe par un maximum ou un minimum, et où, par conséquent, sa variation est nulle.

Mais au synchronisme, *cos φ serait différent de 1.*

L'introduction du coefficient $K < 1$ dans les équations ne changerait pas la forme des courbes obtenues.

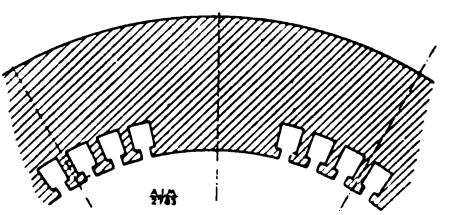


Fig. 32.

2° Un pôle du stator est représenté par la figure 32. Il n'y a pas d'encoches près de l'axe du pôle. Le stator n'est donc pas symétrique dans toutes les directions, comme nous l'avons supposé jusqu'ici, mais *sa réluctance magnétique est beaucoup plus faible près de l'axe du pôle (c'est-à-*

Digitized by Google

dire près des balais de court circuit) que des balais d'alimentation.

Cherchons, en tenant compte de ces deux remarques, la relation entre le courant horizontal I_1 et le courant dynamique de court circuit I'_2. Ces relations sont les mêmes dans les moteurs série et shunt.

Le flux dû à i_1 est $L_1 I_1$. La force électromotrice dynamique de court circuit est $n N L_1 I_1$.

Le courant I'_2 produit un flux $L_2 I'_2$ ($L_2 > L_1$) et embrasse un flux $K/2\pi N L_2 I'_2$ ($K < 1$).

La relation cherchée est :

$$\frac{1}{2\pi} \frac{d\ K N L_2 i'_2)}{dt} = n N L_1 i_1$$

d'où :

$$\omega K L_2 I'_2 = n L_1 i_1$$

Au synchronisme :

$$I'_2 = \frac{1}{K} \frac{L_1}{L_2} I_1$$

$\frac{1}{K}$ est un peu supérieur à 1, $\frac{L_1}{L_2}$ lui est inférieur.

Donc les deux causes d'erreur considérées se compensent en partie.

3° Il y aurait lieu de tenir compte de la différence de répartition des champs rotoriques et statoriques dans l'entrefer. Le premier est à répartition triangulaire, le second à répartition trapézoïdale. M. Latour a montré que cette différence de répartition produit, dans le moteur shunt, un faible couple au démarrage (1).

(1) Voir *Eclairage électrique*. 5 janvier 1907.

Digitized by Google

Appendice II.

Note sur les transformateurs en court-circuit et l'excitation des moteurs Latour.

Le stator et le rotor court-circuité d'un moteur Latour constituent le primaire et le secondaire d'un transformateur dont les résistances ohmiques sont très faibles et dont le noyau possède une réluctance qu'on ne peut négliger.

Etudions, sans nous occuper de moteurs Latour, un tel transformateur. Négligeons la dispersion. Il est toujours possible, par une construction convenable du transformateur, de la rendre aussi petite qu'on le veut. Les équations du courant sont, en supposant égal à 1 le rapport de transformation :

$$E - n\frac{d\Phi}{dt} = R_1 i_1 \qquad (1)$$

$$-n\frac{d\Phi}{dt} = R_2 i_2 \qquad (2)$$

$$\frac{4\pi n}{10}(i_1 + i_2) = \mathcal{R}\,\Phi \qquad (3)$$

1° Supposons $R_1 = o$. Alors, d'après (1), le vecteur Φ est constant et en retard d'un quart de période sur E.

D'après (2) : $R_2 I_2$ est constant et opposé à E.

D'après (3) le vecteur $I_1 + I_2$ est constant et dirigé suivant Φ.

Dans la figure (33) les traits pleins représentent des vecteurs constants.

2° Supposons maintenant que R_2 diminue. Alors, d'après l'équation (2), I_2 croît. La figure (33) montre que I_2 croît aussi.

Si R_2 tend vers o, I_1 et I_2 croissent indéfiniment et tendent à être en opposition (figure 34).

Digitized by Google

Nous ne pouvons supposer que I_1 et I_2 croissent indéfiniment, car le mot infini n'a pas de sens en physique. Si nous admettons que, R_2 devenant très faible, I_1 et I_2 restent finis, nous sommes forcés d'admettre que E et ψ sont très petits (fig. 34) [1].

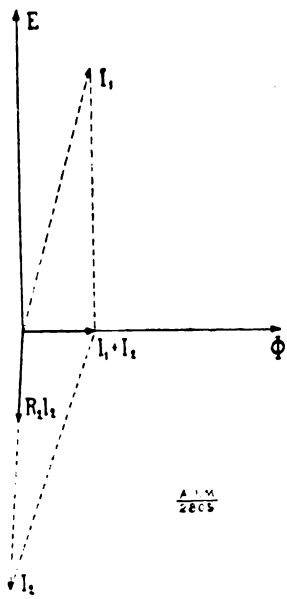


Fig. 33.

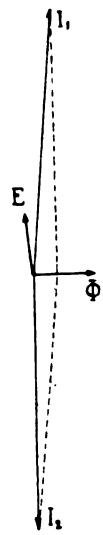


Fig. 34.

Conclusion : *Un transformateur en court-circuit, de résistances ohmiques très faibles et de reluctance non négligeable, ne peut être soumis qu'à une force électromotrice très faible. Dans ce cas, le flux est très faible, les intensités I_1 et I_2 sont en opposition et de grandeur finie.*

(1) En d'autres termes, si R_2 tend vers *o*, R_2 I_2 tend vers *o* à condition que I_2 n'augmente pas indéfiniment. Alors Φ tend vers *o* d'après (2), donc aussi E d'après (1).

Digitized by Google

On ne peut pas dire que I_1 soit en phase avec E sans admettre que R_2 est infiniment petit d'ordre supérieur à R_1 (cas de la figure 33). En effet, si on fait tendre d'abord R_2 vers o, la direction limite de Φ et de I_1 est indéterminée.

Si l'on crée un flux Φ' dans le noyau (par exemple au moyen d'un troisième enroulement parcouru par un courant alternatif), le primaire pourra être soumis à une force électromotrice E' de grandeur finie en quadrature avec Φ'. La différence entre cette force électromotrice E' et la force électromotrice d'induction $-\frac{d\Phi'}{dt}$ sera la force électromotrice très petite qui produira I_1 et I_2.

Ce cas est précisément celui des moteurs Latour. Dans ces moteurs, le champ vertical est produit par le courant dynamique de court-circuit.

L'énergie nécessaire à la production de ce champ, c'est-à-dire à l'excitation du moteur, lui est apportée par les balais d'alimentation. Grâce à la rotation de l'induit, elle est transmise au courant dynamique de court-circuit.

Cette énergie d'excitation est apportée au moteur sous forme de courant *watté*. En effet, le courant qui apporte cette énergie est maximum à l'instant où le champ tournant a une direction moyenne horizontale, c'est-à-dire à l'instant où la force électromotrice aux bornes du stator est maxima.

On voit, par ces remarques, *que le moteur Latour shunt est un simple moteur d'induction auquel on fournit son excitation sous forme de courant watté*, au moyen de balais calés à 90° de l'axe du stator. Il devient alors évident que *si le moteur est trop excité, c'est-à-dire si e est trop grand, le courant principal absorbé par le moteur sera décalé en avant de la tension. Il suffira, pour régler cos φ, de réduire e en intercalant dans le circuit d'excitation une résistance convenable.*

Digitized by Google

Appendice III.

Soit un rotor à collecteur, muni de deux balais opposés, traversé par un courant i.

Ce rotor peut être considéré comme une bobine de self ayant pour axe la ligne de balais.

Le courant i produit un champ magnétique ayant cette droite pour axe. Nous avons appelé $L\,i$ son flux total.

Le flux embrassé par le courant i dans ce champ est égal à

$$\frac{1}{2\pi} N (L\,i)$$

Démontrons-le

Appelons $K N (L\,i)$ ce flux. Calculons K. Pour cela partons d'un résultat de calcul bien connu : si i est un courant alternatif de fréquence ω,

$$i = I \sqrt{2} \sin 2\pi\omega t$$

la force électromotrice d'induction statique due à la traversée du rotor par le courant i a pour expression

$$\omega N (L I) \text{ (1)} \qquad (1)$$

D'autre part, la valeur instantanée de cette force électromotrice est :

$$- K N \frac{d (L\,i)}{d t}$$

et sa valeur efficace :

$$K N \,.\, 2\pi\omega \,.\, (L I)$$

(1) Voir : Maudit, *Machines Électriques*, Dunod, 1910, p. 689.

Cette expression est rigoureuse dans le cas où le flux, dans l'entrefer, est à répartition sinusoïdale. Ici le flux est triangulaire. Cette expression est donc seulement approchée.

Digitized by Google

Pour que ces deux expressions de la force électromotrice statique soient égales, il faut prendre :

$$K \quad \frac{1}{2\pi}$$

Dans l'étude précédente, sur les moteurs Latour, nous avons cherché surtout à bien faire comprendre les phénomènes physiques dont ces moteurs sont le siège.

Pour le moteur shunt, nous avons donné un diagramme expliquant les particularités que présente ce moteur. Ce diagramme n'est pas rigoureux, car il ne tient pas compte de la dispersion, qui, d'ailleurs, a peu d'influence sur la marche du moteur. Nous croyons inutile de chercher un diagramme plus exact, au risque de se lancer dans de longs calculs, car la résistance des balais d'alimentation (R_1) varie à chaque instant, et, comme nous l'avons vu, de petites variations de R_1 peuvent faire varier notablement $\cos \varphi$. La marche du moteur shunt est donc instable au point de vue des variations de $\cos \varphi$. Il est dès lors inutile d'étudier avec précision un état de régime qui ne serait jamais atteint.

(*Applaudissements*).

M. J. Libert, *vice-président*, félicite et remercie le conférencier dont la communication, présentée avec clarté et méthode, a vivement intéressé l'assemblée.

La séance est levée à 22 heures.

Digitized by Google

SÉANCE DU 23 FÉVRIER 1913.

M. H. Chauvin, *président*, au fauteuil.

Ont signé la liste de présence : MM. Barmack ; Chauvin ; Comas ; Dacos ; De Bast ; Defize ; de Moraes ; Diakonoff ; Garlinski ; Ghekière ; Gosseries ; Kaïdanowski ; Koulikoff ; Kraitchik ; Küntziger ; Levitous ; Libert ; Lubansky ; Mielczarski ; Mossay ; Nollet ; Oberoutcheff ; Pavlowsky ; Robert ; Van Meenen.

M. H. Chauvin dépose sur le bureau les ouvrages suivants offerts à l'Association :

Travaux du Laboratoire central d'Électricité, publiés par P. Janet, tomes I et II ; Paris, Gauthier-Villars, 1912 ;

La Téléphonie, par E. Pierard, A. I. M. ; tome II, 3e édition ; Paris et Bruxelles, 1912 ;

L'Électricité à l'Exposition universelle et internationale de Bruxelles de 1910, par J. A. Montpellier ; Paris, H. Dunod et E. Pinat, 1912 ;

Cours d'Électrotechnique générale et appliquée, professé à l'Institut électrotechnique de Lille, publié par R. Swyngedauw avec la collaboration de F. Nègre et P. Beauvais. *Électrotechnique générale* : Tome 1er. *La dynamo à courant continu*, par R. Swyngedauw; Paris et Liége, Ch. Béranger, 1913.

La parole est donnée à notre camarade, le commandant **A. Pirot,** pour sa communication.

Digitized by Google

511.2 Quelques types d'abaques et leur application à l'électricité.

Lorsque l'opinion courante affirme que l'outil ne fait pas l'ouvrier, elle pousse des faits réels à une généralisation outrancière. S'il est, en effet, évident qu'un homme inhabile, même muni des meilleurs instruments, ne peut fournir qu'un travail informe et sans valeur, il n'est pas moins certain qu'un bon ouvrier privé d'outils bien appropriés perd la majeure partie de son habileté professionnelle.

Donnons, au contraire, à cet ouvrier des outils perfectionnés, d'un rendement considérable, d'un emploi aisé, et nous serons en droit d'attendre de lui une amélioration dans le travail.

Nous serons en droit d'attendre, dis-je, mais nous savons tous qu'en pratique, on se heurte à la routine, à l'entêtement des ouvriers. Tous, nous les avons entendus proclamer hautement leurs préférences pour les outils dont ils ont l'habitude, refuser obstinément de reconnaître les avantages des nouveaux, dont ils réussissent souvent à proscrire l'usage pour leur plus grand dam à eux et à ceux qui les emploient.

Eh bien, il est des ingénieurs qui, eux aussi, sont réfractaires à l'emploi d'outils modernes, qui ne comprennent pas l'avantage qu'il y a à s'aider, dans la partie matérielle des calculs, de tous les moyens que la science met à leur disposition et considèrent les procédés nomographiques, les abaques, comme tout au plus bons pour les praticiens malhabiles au calcul.

Il résulte de cet état d'esprit que, pendant longtemps,

Digitized by Google

peu de gens se sont occupés de construire des abaques ; ceux-ci étaient donc rares et leur emploi restreint.

Les abaques méritaient-ils cet ostracisme ? Convient-il de mépriser l'aide qu'ils offrent, le gain de temps qu'ils permettent de réaliser ?

Beaucoup de bons esprits résolvent négativement ces questions et recommandent l'emploi des abaques au même titre que celui de la règle à calcul qui, elle, est presque unanimement appréciée.

Du reste, au cours de ces dernières années, la nomographie et ses applications ont fait l'objet d'une littérature assez importante.

Outre le magistral Traité de Nomographie de M. Maurice d'Ocagne, Ingénieur des Ponts et Chaussées de France, on pourrait citer bon nombre de productions qui ont pour objet soit de traduire de multiples formules, soit de jeter des vues nouvelles sur certains points de la théorie.

Le moment semble donc venu de chercher à étendre aux résultats des calculs électrotechniques la traduction nomographique.

Cette considération justifieront sans doute le choix d'un sujet qui n'a pas avec l'électricité de rapports plus directs qu'avec les autres sciences tributaires de l'expression mathématique. Peu soucieuse en effet de la signification des formules, la nomographie ou science des abaques n'a pour but que de faciliter leur résolution numérique et, comme nous l'avons dit, d'apporter aux calculs les simplifications les plus étendues.

Nous n'avons pas l'intention de passer ici en revue les différents procédés qui ont pour but la traduction graphique des formules.

Outre que nous ne pourrions guère que résumer l'ouvrage de M. d'Ocagne déjà cité, ce n'est pas en quelques instants qu'un tel programme pourrait être réalisé.

Digitized by Google

Les procédés nomographiques sont, en effet, fort nombreux ; ils permettent de représenter des équations de types très divers et même des systèmes de deux équations.

L'exposé de ces procédés absorbe une grande partie de ce volumineux traité, où tous renseignements peuvent être puisés.

Notre but est plus modeste ; ayant eu l'occasion d'appliquer des procédés assez simples de construction d'abaques en y ménageant quelques dispositions peut-être nouvelles et d'un emploi commode, nous nous proposons de les exposer succinctement et d'en examiner ensuite l'application à certaines formules de l'électrotechnique.

PREMIÈRE PARTIE.

EXAMEN DE QUELQUES TYPES D'ABAQUES.

Parmi les outils que l'ingénieur peut utiliser, nous classerons avec M. d'Ocagne les procédés de calcul en cinq catégories, savoir :

les instruments et les machines arithmétiques ;
les instruments logarithmiques ;
les tracés graphiques ;
les tables numériques ou barêmes ;
les tables graphiques ou abaques.

En écartant certaines machines, les barêmes et certains tracés graphiques, on se trouve en présence de procédés ayant des liens de parenté. Mais nous nous bornerons ici à traiter uniquement de certaines catégories d'abaques proprement dits.

Caractère particulier des abaques.

Est-il utile de rappeler ce qu'est un abaque et quels sont les caractères qui le différencient du calcul graphique. Nous savons que ce dernier consiste dans l'exé-

Digitized by Google

cution d'un tracé géométrique correspondant à des valeurs particulières des données du problème à résoudre, et que l'abaque fournit, au contraire, des tracés susceptibles de conduire au résultat pour tous les états possibles des données compris à l'intérieur d'un certain champ de variation. En d'autres termes, tandis que le calcul graphique exige l'exécution d'un dessin correspondant à chaque cas pratique distinct, l'abaque fournit par un seul tracé exécuté une fois pour toutes, la solution d'une infinité de cas.

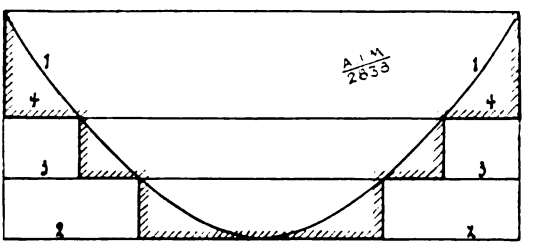


Fig. 1.

Ainsi, par exemple, lorsqu'on recherche graphiquement la répartition des tôles de renfort (fig. 1) sur les semelles d'une poutre en tôles et cornières, on trace le diagramme (1) du moment fléchissant et ceux (2), (3), (4), du moment résistant des divers profils obtenus par enlèvements successifs de tôles aux tables du profil maximum ; on prend les intersections avec le premier diagramme ; ces intersections permettent de fixer le contour hachuré et d'en déduire par projection les limites des tôles de renforcement. La poutre obtenue a ainsi successivement les profils 1, 2, 3, dans les régions indiquées.

Dans cet exemple de calcul graphique, les données du problème sont déterminées : portée et conditions de sollicitation de la poutre, nature du métal, épaisseur des tôles de renforcement, profil initial, etc.

Digitized by Google

Le résultat obtenu répond donc à une valeur bien déterminée de chacune de ces données.

Des abaques solutionnant un tel problème, s'ils étaient construits (à supposer qu'il fût possible de le faire), fourniraient la répartition des tôles non plus pour un système de valeurs déterminé des données, mais au contraire pour tous les cas que l'on pourrait rencontrer entre des limites fixées.

Les figures seraient dans cette hypothèse construites une fois pour toutes et l'ingénieur pourrait se borner à y faire les lectures correspondant aux cas concrets à solutionner.

Telle est la caractéristique de la représentation nomographique.

Classement.

On peut classer en deux grandes catégories les abaques dont nous nous occuperons : les abaques à entrecroisement ou à lignes entrecroisées et les abaques à alignements ou à points alignés.

Les premiers fournissent la solution d'une équation à 3 variables au moyen de 3 systèmes, 3 séries de lignes cotées qui se rencontrent.

Les cotes de 3 lignes qui se croisent en un point fournissent un système de valeurs satisfaisant à l'équation ; de là leur nom d'abaques à lignes entrecroisées.

Dans un abaque à points alignés, au contraire, les valeurs satisfaisant à l'équation sont fournies par les côtés de points situés 3 à 3 en ligne droite.

Abaques a entrecroisement.
Equations a 3 variables.

Soit une équation à 3 variables.

$$f\ \alpha.\ \beta.\ \gamma\ = 0.$$

Digitized by Google

Ayant pris deux axes de coordonnées, portons (fig. 2) sur l'axe des y une échelle de la variable α définie par l'expression $y = \varphi(\alpha)$ convenablement choisie.

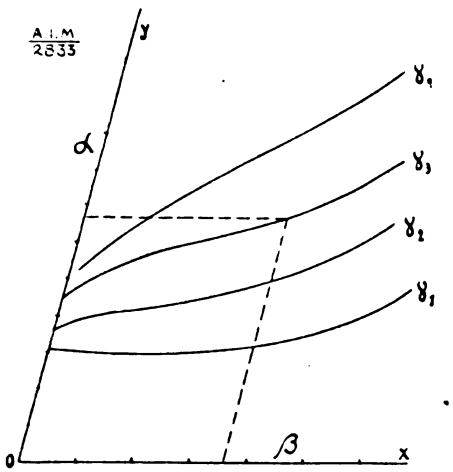


Fig. 2.

En donnant à α des valeurs régulièrement croissantes, nous pourrons calculer les valeurs correspondantes de y, les reporter sur la figure et inscrire à côté des points trouvés les valeurs correspondantes de α.

L'échelle de cette variable est ainsi constituée. On conçoit que suivant la nature de la fonction $\varphi(\alpha)$ choisie, on obtiendra des échelles d'espèces diverses. M. d'Ocagne distingue notamment *l'échelle régulière* définie par la formule

$$y = l\alpha.$$

(l étant un paramètre arbitraire dit module de l'échelle) dans laquelle les points obtenus en faisant croître α par échelons égaux sont régulièrement espacés sur la droite formant support.

Digitized by Google

Un double décimètre ordinaire porte une échelle de ce type.

L'échelle logarithmique dont la formule est $y = l \log \alpha$, est analogue à celle de la règle à calcul.

L'échelle segmentaire $y = l \frac{2\alpha}{\alpha + 1}$ où la cote de chaque point fournit le rapport des segments déterminés sur le support par ce point.

On distingue en outre des échelles dérivées des précédentes par le remplacement de α par une fonction et enfin des échelles transformées, c'est-à-dire obtenues par transformations géométriques des premières.

Fermons cette parenthèse et revenons-en à la traduction de l'équation

$$f(\alpha\, \beta\, \gamma) = 0.$$

L'échelle de α étant construite sur l'axe des y, construisons de la même manière, une échelle de β sur l'axe des x.

Si, entre l'équation donnée et les expressions qui déterminent les échelles, nous éliminons α et β, nous arrivons à une expression

$$f_1(x\, y\, \gamma) = 0$$

fonction des coordonnées courantes et d'une variable γ.

Cela étant, donnons à γ une valeur numérique γ_1.

L'équation

$$f_1(x\, y\, \gamma_1) = 0$$

qui ne contient plus que deux variables, représente une courbe qu'il est possible de tracer sur la figure et que nous coterons γ_1. En donnant à γ une série de valeurs régulièrement espacées, nous tracerons une série de courbes dont l'ensemble constitue l'abaque.

Une telle figure est un abaque à lignes entrecroisées, parce que trois lignes (parallèles aux abscisses, parallèles aux ordonnées et courbe γ) passant par un même point,

Digitized by Google

c'est-à-dire s'entrecroisant, fournissent par leurs cotes un système de valeurs satisfaisant à l'équation.

Nous nous sommes toutefois abstenus de tracer les faisceaux de droites parallèles aux axes, pour ne pas compliquer la figure.

Le mode d'emploi que nous allons indiquer nous permettra de nous en passer et de le remplacer par le tracé des droites appropriées à chaque cas.

Mode d'emploi.

Premier problème :

On se donne α et β. *On demande la valeur de* γ.

Prendre sur les échelles les points correspondant aux valeurs de α et β. Mener par ces points des parallèles aux axes ; en fixer le point de rencontre et déterminer la cote de la courbe passant par ce point.

Si ce point tombe entre deux courbes, on procédera à une interpolation à la vue.

Deuxième problème :

On donne les valeurs α *et* γ ; *on demande la valeur de* β.

Prendre sur l'échelle de α le point correspondant à la valeur donnée.

Mener par ce point une parallèle à l'axe des x.

En déterminer l'intersection avec la courbe cotée γ, et mener par ce point une ordonnée.

Déterminer la cote de l'extrémité de l'abscisse ainsi trouvée.

L'usage de l'abaque est facilité par l'emploi d'un transparent rigide de forme rectangulaire sur lequel sont tracées deux droites-repères perpendiculaires entre elles et parallèles aux bords du rectangle.

Telle est exposée très sommairement et dans ses grandes lignes, la théorie élémentaire des abaques à entrecroisement.

Dans l'application, la chose se complique de multiples

Digitized by Google

considérations dans lesquelles nous ne pouvons entrer ici et qui ont pour but de rendre l'emploi des abaques commode et pratique et d'éliminer le plus possible les causes d'erreurs graphiques.

Exemple.

La figure 3 représente un type d'abaque à lignes entrecroisées dû à M. Allard, ingénieur en chef du Service des phares, et extrait de l'ouvrage de M. d'Ocagne. Il représente les portées lumineuses des phares suivant la formule

$$100\ L\ a^d = d^2$$

dans laquelle d est la portée en km, a *un coefficient de transparence de l'air*, L *la valeur de l'intensité lumineuse.*

Dans cet exemple, les échelles des variables L et a sont définies par des expressions

$$x = l_1 \log a$$
$$y = l_2 \log 100\ L.$$

Classification.

Les types d'abaques d'équations à trois variables que l'on peut construire par ce procédé sont fort nombreux.

Les plus simples sont les abaques à lignes droites ; ce sont aussi les plus fréquents.

Parmi eux on peut citer, comme très répandus, les abaques à parallèles, où les diverses courbes γ se réduisent à un faisceau de lignes droites parallèles entre elles ; les abaques à radiantes dans lesquels les droites γ convergent toutes vers un même point, et enfin, des abaques dans lesquels le faisceau de droites possède une courbe enveloppe du 2e degré, 3e degré, etc. Ces abaques jouissent de propriétés particulières.

Règle pour la construction.

Pour construire l'abaque du type qui nous occupe d'une équation à trois variables, nous procéderons comme suit :

Digitized by Google

1° Exprimer dans le même système d'unités les quantités qui entrent dans la formule.

2° Déterminer les limites des variables entre lesquelles l'abaque doit servir.

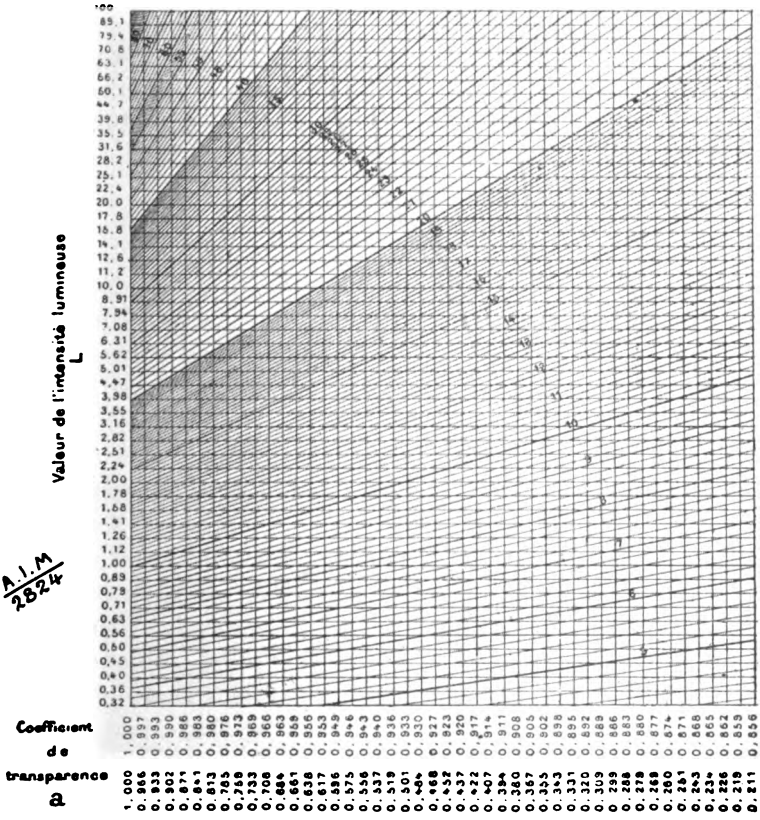


Fig. 3.

3° Déterminer les équations des échelles de deux variables, leurs modules et les construire.

4° Déterminer l'équation générale des lignes représentatives de la 3e variable.

Construire ces lignes.

Digitized by Google

Abaques d'équations a 4, 5. 6 variables.

Il a été possible d'étendre ce procédé de construction d'abaques d'équations à 3 variables à la traduction d'équations à 4, 5 et 6 variables, de certains types.

Soit une équation à cinq variables :

$$X = f\,(tu\ v\ w)$$

que nous nous proposons de traduire (fig.) nomographiquement et supposons que l'on puisse poser

$$\alpha = \varphi\,(t\,.\,u)$$

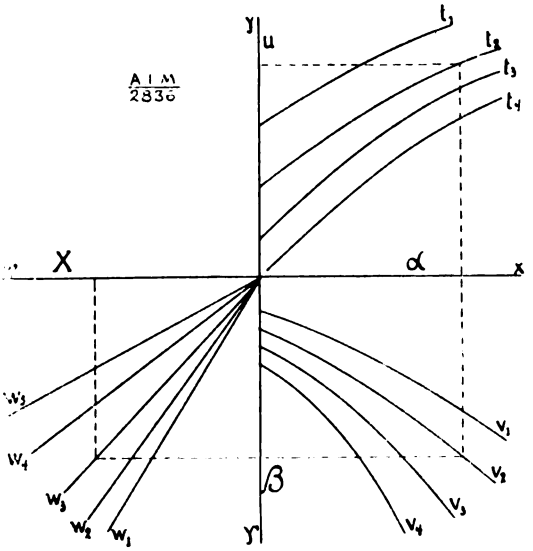


Fig. 4.

de telle manière que l'équation obtenue après substitution

$$X = f_1\,(\alpha\ v,\ w)$$

ne contienne plus ni t ni u.

Cette équation contiendra une variable de moins que l'équation primitive.

Digitized by Google

Supposons encore que l'on puisse avoir :

$$\beta = \psi(\alpha\, v)$$

et

$$X = f_2(\beta\, w)$$

équation qui ne contient plus que 3 variables.

Nous aurons remplacé l'équation primitive par le système d'expressions :

$$\begin{cases} \alpha = \varphi(t\, u) & (1) \\ \beta = \psi(\alpha\, v) & (2) \\ X = f_2\, \beta\, w) & (3) \end{cases}$$

chacune de ces équations ne contenant que 3 variables.

Or, des équations de ce type peuvent en général être représentées à l'aide du procédé exposé plus haut ; considérant par exemple la première de ces équations, on peut construire l'échelle de u et de l'échelle de α, faire le tracé de lignes cotées représentatives des valeurs de t, procéder ensuite de la même manière pour la deuxième et la troisième équation.

Mais, en outre, nous pouvons disposer l'épure de telle manière que l'axe qui porte l'échelle de α dans l'abaque de l'équation (1) se confonde avec celui qui porte l'échelle de la même variable dans l'abaque de l'équation (2).

Dès lors, si l'abaque de l'équation (1) se développe dans l'angle *yox*, celui de l'équation (2) pourra se développer dans l'angle XOY′ et ainsi de proche en proche par la ou les équations suivantes.

Partant des valeurs données de u et t on obtiendra sur OX la valeur de α.

Partant de celle-ci et de la valeur donnée de v on arrivera sur OY′ à la valeur de β.

Partant enfin de celle-ci et de la valeur donnée de w on arrivera enfin à la valeur de X cherchée.

Digitized by Google

Ce dispositif et cette manière de procéder qui ont pour résultat de faciliter les recherches, ont l'avantage de réunir en une seule figure les diverses combinaisons de lignes nécessaires pour représenter chacune des expressions à plus de 3 variables qu'il s'agissait de traduire.

Exemple :

Pour illustrer cette théorie, nous reproduirons (fig. 6) un des abaques que nous avons construits par cette méthode et relatif à une voûte en plein cintre [1].

Cet abaque a pour but de fournir le poids des terres et de la maçonnerie comprises, suivant une tranche d'un mètre d'épaisseur depuis la clef de la voûte en plein cintre

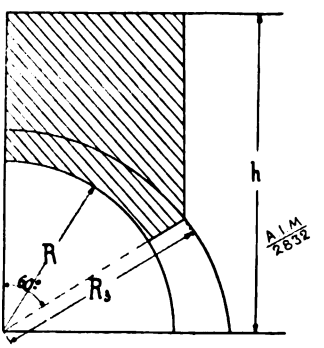


Fig. 5.

jusqu'au point situé à 60° de cette clef. La formule qui fournit ce poids est la suivante :

$$Q = \frac{\delta}{2}\left(1{,}732\, h\, R_3 - 0.433\, R_3^2 - \frac{\pi R^2}{3}\right)$$

dans laquelle Q est le poids cherché, δ, le poids spéci-

(1) Abaques relatifs à la recherche du profil des voûtes en plein cintre et en arc de cercle (*Annales des Travaux Publics de Belgique*, février 1912).

Digitized by Google

fique des terres et de la maçonnerie, *h* la hauteur de la ligne de charge (supposée horizontale) au-dessus des naissances de la voûte, R le rayon de l'intrados, R_3 ce rayon augmenté de l'épaisseur de la voûte au point considéré.

La surface hachurée est un diagramme de ce poids.

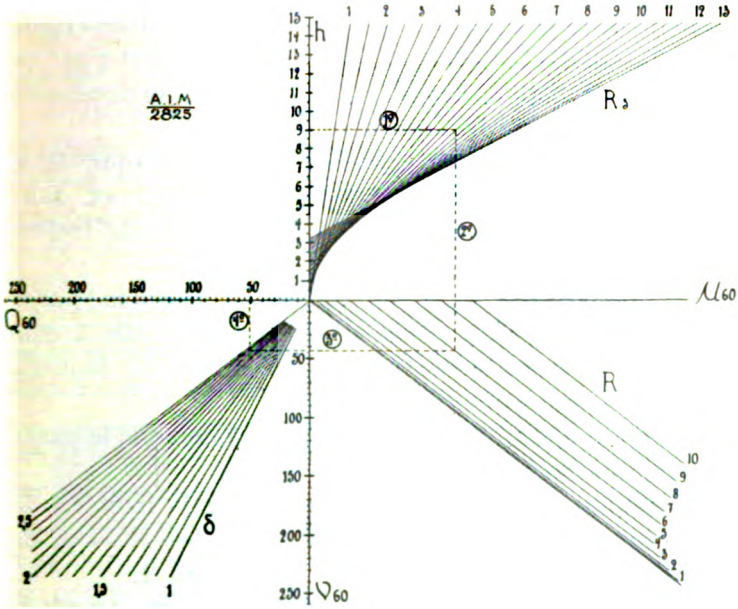


Fig. 6.

Par application du procédé que j'ai signalé plus haut, cette formule a été composée de la manière suivante :

$$Q \begin{cases} \mu = 1.732\, R_3 h - 0{,}433\, R_3^2 & (2) \\ \nu = \mu - \dfrac{\pi R^2}{3} & (3) \\ Q = \dfrac{\delta}{2}\, \nu & (4) \end{cases}$$

expressions qui contiennent chacune 3 variables.

Digitized by Google

Dans l'angle YOX se trouve la représentation de la formule (2).

Les courbes cotées s'y réduisent à un faisceau de droites, faisceau que nous dénommerons faisceau de 2e degré parce que la courbe enveloppe en est une conique (parabole).

L'échelle de μ n'est pas graduée, la valeur numérique de cette variable auxiliaire ne nous intéressant pas: ce qu'il importait était seulement d'obtenir géométriquement l'extrémité de l'abscisse qui la représente.

Dans l'angle inférieur droit se trouve l'abaque de ν, composé d'un faisceau de droites parallèles et dans l'angle inférieur gauche l'abaque de Q, formé de droites concourantes.

(Exceptionnellement, le support de ν a été gradué parce que la valeur de cette fonction auxiliaire est utile à connaître pour la suite de la question en vue de laquelle l'abaque avait été construit.)

Il me paraît utile de montrer à titre d'exemple le mode d'emploi de cet abaque.

Supposons qu'on donne les valeurs de la hauteur de ligne de charge $h = 9$, du rayon d'intrados $R = 7$, de $R_3 = 7{,}5$ et du poids spécifique $\delta = 2$, tonnes, 4.

Règle : 1° *Au point représentatif de la valeur donnée de h, placer le bord d'une règle parallèlement aux abscisses.*

Marquer le point de rencontre de la règle et de la droite correspondant à la valeur donnée de R_3;

2° *à ce point, placer la règle parallèlement aux ordonnées.*

Marquer son point de rencontre avec la droite correspondant à la valeur donnée de R ;

3° *A ce point, placer la règle parallèlement à l'axe des X.*

Marquer le point de rencontre avec la droite correspondant à la valeur donnée de d ;

4° *A ce point placer la règle parallèlement aux ordonnées.*

Digitized by Google

Lire la valeur de Q en son point de rencontre avec l'axe des X.

Par l'applicatton de cette règle, nous trouvons la valeur

$$Q = 51 \text{ tonnes.}$$

Abaques a alignements.

M. d'Ocagne expose, dans son *Traité de Nomographie*, une théorie des abaques à alignements des équations à 3 variables. Elle est basée sur l'emploi des coordonnées parallèles dont la connaissance n'est guère répandue.

C'est, au point didactique, un inconvénient qui n'a pas échappé à l'auteur, car il esquisse ensuite une théorie basée uniquement sur les coordonnées cartésiennes ponctuelles.

Le Capitaine du Génie Schoofs de notre armée a développé cette théorie, lui a donné un caractère plus général et en a fait d'heureuses applications (1).

C'est cette dernière théorie que j'exposerai en premier lieu et je donnerai ensuite un rapide aperçu de la théorie par coordonnées parallèles de M. d'Ocagne.

Le problème conçu sous une forme générale consiste à construire des échelles des diverses variables telles que les points correspondant aux systèmes de valeurs qui satisfont à l'équation donnée se trouvent simultanément sur une courbe de forme connue et déterminée.

Plus particulièrement nous nous restreindrons au cas où cette courbe est réduite à une droite.

Les points dont nous venons de parler seront donc dans ce cas en ligne droite, c'est-à-dire alignés, ce qui justifie la dénomination du type d'abaque.

(1) *Théorie élémentaire des abaques à transversales*, par G. Schoofs, capitaine du génie. (*Annales des Travaux Publics de Belgique*, février 1910).

Digitized by Google

Théorie par les coordonnées cartésiennes.

Soit une équation à trois variables $\alpha\,\beta\,\gamma$ qui puisse se mettre sous la forme d'un déterminant.

$$(1) \qquad \begin{vmatrix} F_1(\alpha) & \Phi_1(\alpha) & \psi_1(\alpha) \\ F_2(\beta) & \Phi_2(\beta) & \psi_2(\beta) \\ F_3(\gamma) & \Phi_3(\gamma) & \psi_3(\gamma) \end{vmatrix} = 0$$

lequel peut se réduire à la forme :

$$(2) \qquad \begin{vmatrix} f_1(\alpha) & \varphi_1(\alpha) & 1 \\ f_2(\beta) & \varphi_2(\beta) & 1 \\ f_3(\gamma) & \varphi_3(\gamma) & 1 \end{vmatrix} = 0$$

Considérons, d'autre part, trois points A B C dont les coordonnées cartésiennes soient :

$$A \left\{ \begin{array}{l} x_1 = f_1(\alpha) \\ y_1 = \varphi_1(\alpha) \end{array} \right.$$

$$B \left\{ \begin{array}{l} x_2 = f_2(\beta) \\ y_2 = \varphi_2(\beta) \end{array} \right.$$

$$C \left\{ \begin{array}{l} x_3 = f_3(\gamma) \\ y_3 = \varphi_3(\gamma) \end{array} \right.$$

Si entre les expressions de x_1 et y_1 nous éliminons α, nous obtenons une équation en x_1 et y_1 qui représente le lieu géométrique du point A.

A chaque valeur de α correspondent des valeurs x_1 et y_1 et, par conséquent, une position de A.

Nous pouvons donc tracer sur le lieu ainsi trouvé une échelle de α, en calculant pour chaque valeur de cette variable la position du point correspondant, en le reportant sur la figure et en y inscrivant les valeurs choisies de α.

Digitized by Google

Supposons que nous ayons agi de même pour B et C.

Nous sommes en possession de trois échelles représentatrices des trois variables.

Cela étant, exprimons la condition analytique pour que les trois points A B C soient en ligne droite.

L'expression de cette condition reproduit précisément l'équation (1).

Il en résulte que tout système de valeurs satisfaisant à l'équation donnée correspond à des points alignés sur la figure.

Les valeurs de deux variables étant données, il suffira donc de rechercher le point de la 3e échelle qui est aligné avec les deux premiers pour trouver la solution de l'équation. Cette opération se fait au moyen d'un fil que l'on tend convenablement, d'une règle ou d'un transparent rigide portant un trait rectiligne.

En pratique, en mettant l'équation donnée sous forme de déterminant, il est souvent avantageux de multiplier lignes ou colonnes par des constantes convenables, afin de faciliter les constructions.

Il y a là, comme du reste dans l'établissement de tout abaque, un travail de tâtonnement qui constitue, l'art de l'opérateur.

Règle pour la construction.

1) *Exprimer les différentes quantités qui interviennent dans la formule, en fonction du même système d'unités.*

2) *Fixer les limites variables entre lesquelles l'abaque doit servir.*

3) *Ecrire les équations des échelles.*

Déterminer les unités de longueur l_x et l_y suivant les axes de coordonnées adoptés. (Je reviendrai dans un instant sur ce point.)

4) *Construire les supports, soit par points, soit en en déterminant les équations et les graduer.*

Digitized by Google

Nous aurons l'occasion dans la suite de faire une application de cette règle.

J'ai dit au 3° qu'il fallait fixer les unités de longueur suivant les axes.

Ceci se fait simplement :

Considérons une des variables α, l'équation de son abscisse

$$x = f_1(\alpha)$$

et fixons-nous la dimension maxima L adoptée suivant l'axe des x pour la construction de l'échelle. Cette dimension dépend de la volonté de l'opérateur, laquelle se fixe elle-même par la considération des conditions pratiques d'emploi commode du graphique.

Si a_1 et a_2 sont les limites de la variable α entre lesquelles l'abaque doit servir, nous poserons :

$$L = l_x \left\{ f_1(a_1) - f_2(a_2) \right\}$$

Bien entendu, il faut partir, pour cette opération, de la variable dont la variation suivant les abscisses est le plus étendue. On déterminera de même l_y.

Telle est d'une façon générale le procédé à appliquer pour les équations à trois variables; dans la pratique des simplifications importantes se rencontrent fréquemment.

Suivant la forme des équations que l'on traite un ou plusieurs supports peuvent devenir rectilignes, deux ou même les trois supports peuvent être parallèles, etc.

Je citerai à ce point de vue l'abaque à trois échelles parallèles dont l'équation type a la forme :

$$F_1(\alpha)_1 + F_2(\beta) + F_3(\gamma) = o$$

l'abaque à trois échelles rectilignes dont deux parallèles entre elles.

$$\text{type : } F_1(\alpha) + F_2(\beta)\, F_3(\gamma) = o$$

Digitized by Google

l'abaque à trois échelles rectilignes issues d'un même point qui a le même type que la première.

Enfin, on trouve des abaques à trois échelles rectilignes quelconques, à deux échelles rectilignes et une curviligne, etc. Les combinaisons sont donc nombreuses.

Exemple.

La figure 7 représente un abaque du type à trois

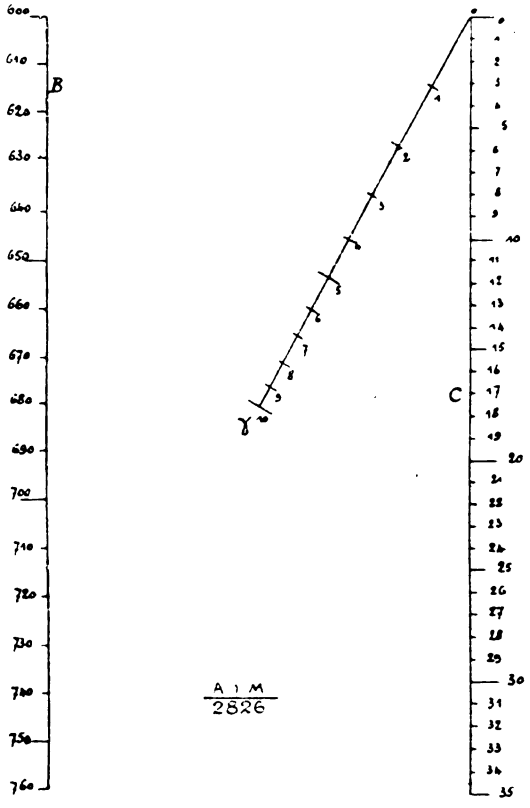


Fig. 7.

échelles rectilignes dont deux parallèles qui a été construit d'après le procédé que je viens d'exposer.

Digitized by Google

Il traduit la formule de la correction thermométrique dans un nivellement barométrique.

$$C = \gamma (16{,}46 - 0{,}216\ B)$$

dans laquelle C est la correction cherchée, γ la différence entre la température moyenne du lieu et la température momentanée, B la lecture barométrique.

Cette formule extraite d'un ouvrage du Capitaine du Génie Maury [1], membre de notre Association, a été traduite nomographiquement dans la brochure du Capitaine Schoofs déjà citée.

Procédé par les coordonnées parallèles.

Passons à l'exposé de la théorie des abaques à points alignés par les coordonnées parallèles.

On appelle (fig. 8) coordonnées parallèles *u* et *v* *d'une droite* les distances A M et B N prises avec leurs signes des points M et N où cette droite coupe deux axes parallèles, A*u*, B*v*, aux origines A et B de ces axes.

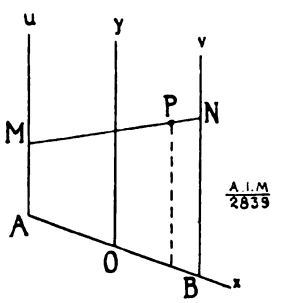


Fig. 8.

[1] *Emploi des réseaux géodésiques pour les études de tracés dans les pays neufs*, par G. Maury, capitaine du Génie (*Annales des Travaux Publics de Belgique*, décembre 1909).

Digitized by Google

Dans ce système de coordonnées, une équation du premier degré

$$au + bv + c = o$$

représente un point P de la droite MN. Pour le fixer choisissons un système d'axes coordonnés cartésiens dont l'origine soit au milieu de la droite AB des origines, l'axe des x suivant cette droite, l'axe des y parallèles aux axes Au, Bv.

On démontre que les coordonnées du point P représenté par l'équation (1) dans le système parallèle, sont, dans le système cartésien :

$$x = \frac{b - a}{b + a} \delta$$

$$y = \frac{-c}{b + a}$$

δ étant la moitié de la distance AB.

En outre, si nous imaginons trois équations de l'espèce représentant chacune un point, la condition pour que ces trois points soient en ligne droite est la même que celle qui exprimerait le passage par un même point des trois droites obtenues en remplaçant les coordonnées courantes u et v par x et y dans les équations.

Si donc une formule a été mise sous la forme :

$$\begin{vmatrix} f_1(\alpha), & \varphi_1(\alpha), & \psi_1(\alpha) \\ f_2(\beta), & \varphi_2(\beta), & \psi_2(\beta) \\ f_3(\gamma), & \varphi_3(\gamma), & \psi_3(\gamma) \end{vmatrix} = o$$

et si nous considérons les équations

$$u f_1(\alpha) + v \varphi_1(\alpha) + \psi_1(\alpha) = o \qquad (1)$$

$$u f_2(\beta) + v \varphi_2(\beta) + \psi_2(\beta) = o \qquad (2)$$

$$u f_3(\gamma) + v \varphi_3(\gamma) + \psi_3(\gamma) = o \qquad (3)$$

la condition pour que les trois points qu'elles représentent

Digitized by Google

soient en ligne droite reproduit le déterminant initial. Comme chacune de ces équations est fonction d'un seul paramètre α, β ou γ, nous pourrons construire leurs échelles : en effet, à toute valeur de la variable α correspondra une forme de l'équation (1), par conséquent, une valeur des coordonnées x, y, une position du point P ; il en sera de même des deux autres équations.

En donnant donc des valeurs aux variables, nous calculerons la position des points correspondants, que nous reporterons sur la figure.

Les points alignés de ces échelles fournissent les solutions de l'équation.

Dans de nombreux cas, le procédé se simplifie beaucoup, lorsque deux des échelles peuvent être confondues avec les axes parallèles et on peut alors procéder simplement comme suit :

Soit, par exemple, une équation de la forme :

$$f_1(\alpha_1) + f_2(\beta_2) + f_3(\gamma_3) = 0. \tag{4}$$

On peut poser :

$$u = l_1 f_1(\alpha_1) \tag{5}$$

$$v = l_2 f_2(\beta) \tag{6}$$

l_1, l_2 étant des modules arbitraires, et en déduire l'équation :

$$\frac{u}{l_1} + \frac{v}{l_2} + f_3(\gamma) = 0 \tag{7}$$

équation d'une échelle de γ qu'il est aisé de construire.

D'autre part, les échelles de α et β sur les axes Au et Bv sont définies par les équations (5) et (6). L'abaque se construit ainsi aisément.

Règle pour la construction.

Pour construire un abaque rentrant dans cette dernière catégorie, nous procéderons de la manière suivante :

Digitized by Google

1) *Exprimer les différentes quantités qui interviennent dans la formule en fonction du même système d'unités ;*

2) *Fixer les limites des variables entre lesquelles l'abaque doit servir ;*

3) *Choisir la position des axes* A*u*, B*v*. *Ecrire les équations des échelles suivant ces axes.*

En déterminer les modules et les construire. (*La détermination des modules se fera par un procédé analogue à celui que nous avons exposé pour la recherche des unités de longueur, dans la théorie par les coordonnées cartésiennes*).

4) *Déterminer les formules donnant les coordonnées de la troisième variable et construire son échelle.*

Equations a *n* variables.

Il me reste à vous exposer comment on pourra, dans certains cas, étendre ce procédé de traduction à des équations contenant un nombre de variables plus élevé trois.

L'artifice est le même que celui qui a été exposé à l'occasion de la théorie des abaques à lignes entrecroisées.

Il consiste à remplacer l'équation donnée

$$X = f(t, u, v, w....)$$

par un système d'équations

$$\alpha = \varphi(t\, u) \qquad (1)$$
$$\beta = \psi(\alpha\, v) \qquad (2)$$
$$X = f(\beta\, w) \qquad (3)$$

etc.

et à construire successivement (fig. 9) les abaques de ces équations, en faisant en sorte que l'échelle de α soit commune aux abaques des deux premières équations, celle de β, commune à la 2e et à la 3e, etc.

Partant des valeurs données de u et t, on trouvera en A le point représentatif de la valeur de α.

Digitized by Google

Partant de ce point et de la valeur donnée de v, on trouvera en B le point représentatif de β ; partant enfin de ce point et de la valeur de w qui est donnée, on trouvera en C la valeur cherchée de X.

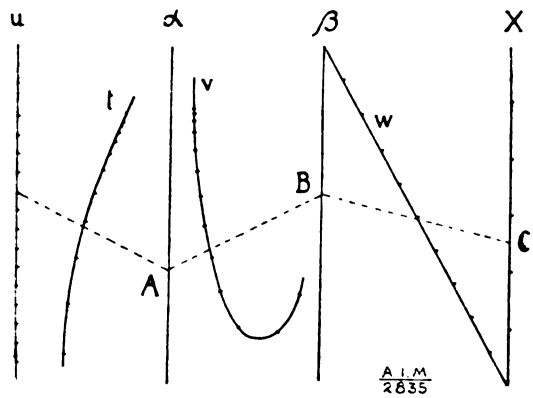


Fig. 9.

La décomposition d'une équation à n variables en un système de l'espèce qui nous occupe n'est pas toujours possible ; le procédé n'est donc pas général, mais peut s'appliquer dans beaucoup de cas.

Nous rencontrons, en outre, dans la suite, des exemples de décomposition d'équations par l'application d'artifices quelque peu plus compliqués.

Nous terminons ici l'exposé théorique des quelques procédés nomographiques que je m'étais proposé de montrer.

Nous avons examiné successivement les abaques à entrecroisement d'équations à 3 variables, et leur application à certaines équations à 4, 5 ou 6 variables ; puis nous avons jeté un coup d'œil sur 2 théories des abaques à alignements des équations à 3 variables et leur extension à des équations à n variables.

Digitized by Google

Exemples de constructions.

Il serait actuellement intéressant de traiter un exemple dans chacune des théories et, afin que cet exemple se rattache à l'électrotechnique, nous choisirons les formules qui donnent la résistance de conducteurs, de section rectangulaire et de section circulaire.

$$R = \frac{\rho L}{b h}$$

$$R = \frac{4 \rho L}{\pi d^2}$$

L, longueur du conducteur, ρ la résistivité du métal, b et h les dimensions de la section rectangulaire, d le diamètre de la section circulaire.

Mais, dira-t-on, la construction de ces abaques est une peine bien inutile, ces formules simples se résolvent à la règle avec une extrême facilité et, dès lors, point n'est besoin de posséder des graphiques supplémentaires.

C'est vrai : toutefois, il faut remarquer que sur l'abaque nous pourrons indiquer les points correspondants aux valeurs de ρ de divers métaux, en inscrivant en regard leur spécification ; le calculateur évitera ainsi de devoir consulter un aide-mémoire pour trouver cette valeur avant de faire le calcul ; c'est un léger avantage.

Mais, ce qui nous a surtout décidé à choisir ces formes simples, ce n'est pas le point de vue pratique, c'est le souci d'éviter à nos auditeurs un chiffrage fastidieux de considérer uniquement à ce point de vue les abaques que nous allons construire.

Exemple d'abaque à entrecroisement.

Commençons par la formule $R = \frac{\rho L}{Ch}$ que nous nous proposons de traduire par un abaque (fig. 10) à entrecroisement.

Digitized by Google

Posons :

$$\mu = \rho L$$

$$\nu = \frac{\mu}{b}$$

$$R = \frac{\nu}{h}$$

$$1^{\circ} \quad \mu = \rho L$$

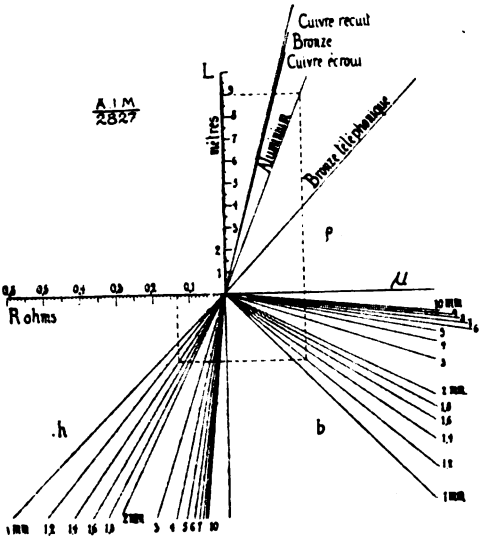


Fig. 10.

Nous appliquerons la règle que nous avons énoncée :

1) *Exprimer dans le même système d'unités les quantités qui entrent dans la formule :*

L en centimètres.

ρ en microhms-cm.

2) *Déterminer les limites des variables.*

Les barres de section rectangulaire n'étant en général pas employées en grandes longueurs, nous prendrons L de 0 à 10 mètres soit 0 à 10^3 cm.

Digitized by Google

Considérons en outre ρ de 0 à 6 microhms cm, espace qui enveloppe de nombreux métaux, cuivres et bronzes divers, argent, laiton, aluminium, etc., à l'exclusion du fer.

μ sera donc compris entre

$$0 \text{ et } 6 \times 10^3.$$

3) *Déterminer les équations des échelles et les construire.*

Nous poserons :

$$\begin{cases} y = l_1 \, L \\ x = l_2 \, \mu \end{cases}$$

En fixant à 10 cm la longueur maxima des échelles, nous pourrons poser :

y maximum soit 10 cm $= l_1$,

$$L \text{ max.} = l_1 \, 10^3.$$

$$l_1 = \frac{10}{10^3} = 10^{-2} \text{ cm.}$$

De même, on obtient :

$$10 = l_2, \, 10^3 \, 6$$

$$l_2 = \frac{10^{-2}}{6}$$

Introduites dans les formules des échelles, ces quantités donnent :

$$y = 10^{-2} \, L$$

$$x = \frac{10^{-2}}{6} \, \mu$$

4) *Déterminer l'équation générale des lignes représentatives de la 3e variable et les construire.*

Introduisant dans l'équation les valeurs de L et μ, on obtient :

$$6 \, x = \rho \, y$$

équation d'un faisceau de droites passant par l'origine.

Digitized by Google

Pour le construire il suffira de couper, par exemple, par la droite

$$y = 6.$$

On obtient

$$X = \rho.$$

Il suffit donc de porter sur cette droite les valeurs de ρ et joindre à l'origine pour obtenir le faisceau construit.

Le résultat de ces constructions figure dans l'angle supérieur droit de la planche IV.

Je n'entrerai pas dans le détail en ce qui concerne la 2e et la 3e équation, qui se construisent d'une façon tout à fait analogue à la précédente.

Traitons sur cette figure un exemple :

Soit à chercher la résistance d'une barre de laiton de 9 m 20 de longueur et 12 mm sur 2 mm de section.

Partant de la longueur 9 m 20 et de la résistivité du laiton, on trouve le point A. De ce point et connaissant la base 12 mm on trouve B. Du point B, et connaissant la hauteur 2 mm, on trouve sur l'échelle de R la valeur cherchée.

Ici se placent deux remarques.

1re remarque : Les supports intermédiaires de μ et v n'ont pas été gradués, la connaissance des valeurs de ces variables auxiliaires nous étant tout à fait inutile.

2e remarque : Pour la commodité de l'emploi, les inscriptions sur les graduations ont été faites suivant le cas en mètres, millimètres, microhms-cm, ohms, alors que les calculs ont été faits dans un système d'unités bien déterminé; l'usage de l'abaque est rendu ainsi tout à fait pratique.

Exemples d'abaque à alignements.

Passons à présent, à la traduction de la formule :

Digitized by Google

$$\mathcal{R} = \frac{4\,\rho\,L}{\pi\,d^2}$$

par les abaques (fig. 11) à points alignés.

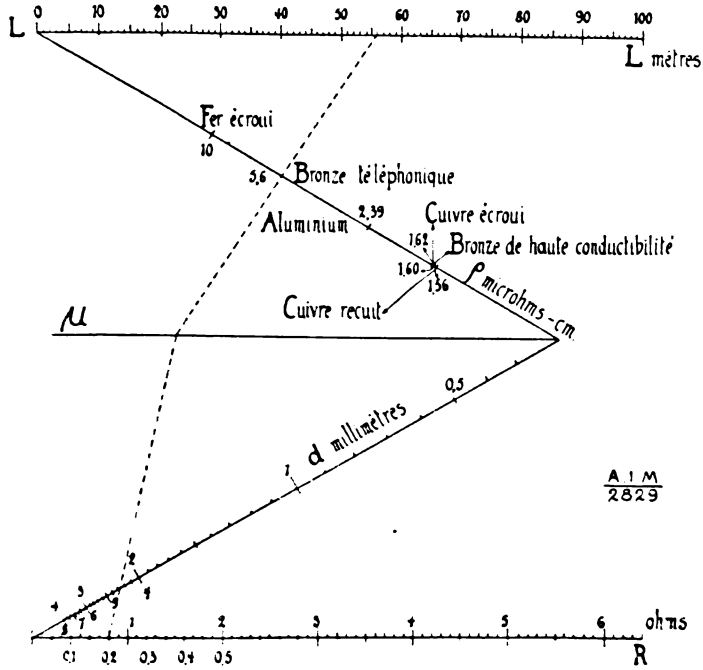


Fig. 11.

Nous décomposerons comme suit cette formule :

$$\mu = 4\,\rho\,L \qquad (1)$$

$$\mathcal{R} = \frac{\mu}{\pi\,d^2} \qquad (2)$$

Exemple de la méthode par les coordonnées cartésiennes.

Commençons par traduire la formule (1) et pour ce faire nous utiliserons la méthode du capitaine Schoofs.

Digitized by Google

La formule donnée peut se mettre sous la forme d'un déterminant.

$$\begin{vmatrix} 20\,L & 0 & 1 \\ -\mu & 1 & 1 \\ 0 & 5 & 1 \\ & 5+\rho & \end{vmatrix} = 0$$

Appliquons la règle donnée précédemment et que je répète ici pour la clarté de l'exposition.

1° *Exprimer les diverses quantités en fonction du même système d'unités.*

L longueur en centimètres.
ρ en microhms-centimètres.

2° *Fixer les limites des variables.*

L variera de 0 à 10^4 (100 mètres).
ρ de 0 à 5 microhms-cm.

La fonction auxiliaire μ variera dans ces conditions de 0 à 2×10^5.

3° *Ecrire les équations des échelles.*

Déterminer les unités de longueur $l\,x$ et $l\,y$ suivant les axes des coordonnées.

Nous écrirons suivant la théorie donnée :

$$\text{Echelle de } L\,x_1 = L\,y_1 = 0$$
$$\text{Echelle de } \mu\,x_2 = -\mu\,y_2 = 1$$
$$\text{Echelle de } \rho\,x_3 = 0\,y_3 = \frac{5}{5+\rho}$$

Ces formules montrent que les échelles de L et μ auront pour support respectivement l'axe des x et une parallèle à cet axe et que l'échelle de ρ aura pour support l'axe des y dont nous choisirons, bien entendu, la direction à notre convenance.

Digitized by Google

La variable μ ayant le plus grand champ de variation, c'est de cette variable que nous partirons pour déterminer l'unité de longueur suivant les x.

Fixons à 20 cm la longueur maxima de l'axe des x.

Nous aurons :

$$20 = 2 \times 10^5 \times l_x.$$
$$l_x = 10^{-4}.$$

Quant à l'unité suivant l'axe des y nous la trouverons d'une façon analogue en faisant :

$$l_y \left\{ -\frac{5}{5+0} - \frac{5}{5+5} \right\} = 10$$
$$l_y = 20.$$

Traçons un axe des x et un axe des y incliné sur celui-ci.

L'équation du support de μ étant $y = 1$, il suffira de porter sur l'axe des y une unité de longueur l_y, soit 20 centimètres et par ce point mener une parallèle à OX.

Rien n'est plus simple, à présent, que de graduer les échelles ; il suffit d'introduire dans leurs équations des valeurs des variables, de calculer les valeurs de x ou y et les reporter sur la figure.

Ces opérations conduisent au tracé de la partie supérieure de l'abaque de la figure 11.

Ici se placent deux remarques analogues à celles que nous avons formulées précédemment à l'occasion d'un abaque à lignes entrecroisées :

1° La graduation de l'échelle auxiliaire de μ n'est pas nécessaire.

2° Les inscriptions sur les graduations ont été faits après coup en unités pratiques.

En outre :

3° Nous avons porté sur l'échelle f des points sortant des limites que nous nous étions fixées (fer écroui et bronze téléphonique).

Digitized by Google

Ces points pourront le plus souvent être utilisés si la valeur de L n'est pas trop grande, et l'étendue de l'emploi de l'abaque se trouve ainsi agrandie en beaucoup de cas.

Exemple de la méthode par coordonnées parallèles.

Passons à la représentation de la 2e partie de l'équation

$$R = \frac{\mu}{\pi d^2}.$$

Pour traiter un exemple suivant chacune des théories que nous avons rencontrées, nous construirons cet abaque par la méthode des coordonnées parallèles et appliquerons la règle énoncée à l'occasion de l'exposé de cette théorie.

1° *Exprimer les variables dans le même système d'unités,*

R en microhms,
d en centimètres.

2° *Fixer les limites de variation des variables.*

Il convient de faire varier d de 1 à 8,25 millimètres.

Toutefois, pour rendre l'épure plus claire, nous nous bornerons à une variation de 1 à 4 millimètres, nous réservant dans la suite de doubler nos échelles par d'autres relatives à la variation de 4 à 8 millimètres.

Comme nous l'avons vu, μ variant de o à 2.10^5, R aura comme limite o et $2/\pi\ 10^7$, résultat aisé à vérifier.

3° *Choisir la position des axes* Au, Bv, *écrire les équations des échelles suivant ces axes, en déterminer les modules et les construire.*

Les équations en u et v des échelles seront :

$$\begin{cases} u = -l_2\,\mu \\ v = l_3\,R \end{cases}$$

le module l_2 de l'échelle μ doit être déterminé de telle manière que cette échelle soit identique à celle que nous avons trouvée dans la traduction de l'équation auxiliaire

Digitized by Google

précédente, puisque cette échelle doit être *commune* aux deux abaques. Nous calculerons donc ce module comme nous avons calculé précédemment l'unité de longueur suivant les x, c'est-à-dire en posant :

$$20 = 2.10^5 \, l_2$$

d'où $$l_2 = 10^{-4}$$

Quant à l_3, il s'obtiendra en écrivant

$$20 = l_3 \, 2/\pi \, 10^7$$
$$l_3 = \pi \, 10^{-6}.$$

Les équations des échelles deviennent ainsi :

$$u = -10^{-4} \mu$$
$$v = \pi \, 10^{-6} \, R$$

échelles régulières qu'il est très aisé de construire.

Rappelons que la construction de la première de ces échelles est inutile.

4° *Déterminer les formules donnant les coordonnées de la troisième variable et construire son échelle.*

Introduisons les valeurs des variables μ et R dans la formule donnée, en fonction de u et v :

$$\frac{u}{10^{-4}} \quad \frac{1}{\pi d^2} - \frac{v}{\pi \, 10^{-6}} = 0$$

ou $u - 100 \, d^2 \, v = 0$.

Comme nous l'avons vu, les coordonnées sont données par

$$x = \frac{b - a}{b + a} \delta$$

$$y = \frac{c}{b + a}$$

2δ étant la distance des origines.

Digitized by Google

Appliquées au cas actuel, ces formules donnent :

$$\begin{cases} x = 6 \dfrac{100\,d^2 - 1}{100\,d^2 + 1} \\ y = 0 \end{cases}$$

Ceci montre que le support de l'échelle est l'axe des x, c'est-à-dire la droite qui unit les origines des autres échelles.

La formule est ainsi représentée dans les limites que nous avons indiquées. Pour étendre son emploi à des diamètres compris entre 4 et 8 millimètres, il suffit de remarquer qu'en multipliant par deux les cotes de l'échelle de d, c'est-à-dire en doublant les diamètres, on sera amené à diviser par 4 les valeurs de R correspondantes.

Forts de cette remarque, nous avons tracé *en-dessous* des supports, des tronçons d'échelles à utiliser dans ces conditions ; il est bien entendu que l'on doit toujours employer simultanément soit les deux échelles tracées au-dessus des supports, soit les deux échelles situées en-dessous.

Enfin, l'abaque étant construit, il n'y a plus de raison de conserver aux échelles la numération incommode qui résulte de l'emploi des unités, centimètres-microhm, etc.

Nous inscrirons les valeurs des longueurs en mètres, celle des diamètres en millimètres, celles des résistivités en microhm-centimètres, celles des résistances en ohms.

Appliquons à un exemple l'abaque.

Soit à chercher la résistance d'un conducteur en bronze téléphonique de 5600 mètres de longueur et de 4 millimètres de diamètre.

Nous placerons le fil sur la division 56 de l'échelle de L et sur le point de la 2e échelle qui correspond au bronze. Partant du point trouvé sur l'échelle de μ, nous placerons le fil sur ce point et sur la graduation 4,5 de l'échelle du

Digitized by Google

diamètre ; nous lirons enfin, sur la graduation *inférieure* de l'échelle de R une valeur très voisine de 0,2 ohms que nous pourrons estimer à 0,198.

Comme nous sommes partis de la longueur 56 et non 5600, il faut actuellement multiplier ce résultat par 100 et l'on trouve enfin :

$$R = 19{,}80 \text{ ohms.}$$

Le calcul exécuté à la règle conduit à ce résultat ; sans règle, on obtiendrait

$$R = 19{,}84 \text{ ohms.}$$

La précision de l'abaque paraît donc suffisante.

Ces différents exemples peuvent faire surgir dans l'esprit une question certainement importante : quel est, en pratique, le type abaque à entrecroisement ou abaque à alignement, qu'il convient de choisir ?

Il est indéniable que les abaques à alignements sont d'un emploi plus aisé que les autres, dans la mesure de la grande commodité que l'on éprouve à unir des points par des droites que de tracer des parallèles à des axes fixes.

Ils sont du reste moins sujets à produire des confusions.

Monsieur d'Ocagne a écrit à ce sujet :

« Le mode d'emploi de l'abaque à entrecroisement se » réduit toujours à ce qui suit : prendre le point de ren- » contre de deux droites cotées et lire la cote d'une ligne, » droite ou courbe passant par ce point.

» Or, du fait qu'une cote inscrite en un point d'une » ligne s'étend à toute cette ligne, il résulte qu'il faut, soit » en partant de cette cote pour chercher un point d'inter- » section situé sur la ligne, soit en partant de ce point » pour chercher la cote, suivre la ligne sur une certaine » étendue.

» Cette opération s'appliquant à trois lignes pour chaque

Digitized by Google

» lecture, on risque, pour peu qu'on ait quelque défaut
» d'attention, de passer de la ligne qui devrait être suivie
» à la voisine, et, par suite, de commettre une erreur de
» lecture.

» En outre, si les valeurs des variables auxquelles on a
» affaire ne sont pas de celles auxquelles correspondent
» des lignes effectivement tracées sur l'abaque, il faut, par
» la pensée, faire une interpolation entre ces lignes, opé-
» ration qui n'est pas tout à fait aussi simple que lorsqu'il
» s'agit de placer, également à vue, un point intermédiaire
» entre ceux d'une échelle portée sur une ligne.

» Enfin, l'enchevêtrement des lignes sur les abaques
» précédemment décrits (à entrecroisement) peut, à la
» longue, produire une certaine fatigue de la vue.

» Ces inconvénients, ajoute M. d'Ocagne, ne sont pas,
» tant s'en faut, de nature à faire renoncer à l'emploi des
» abaques à entrecroisement... ; ils sont assez sensibles
» cependant pour qu'on se soit préoccupé des moyens de
» s'en affranchir. »

Le capitaine Schoofs, dans sa brochure « Théorie élémentaire des abaques à transversales », dit excellemment :

« Les premiers (abaques à entrecroisement)..... sont
» appliqués surtout pour la représentation graphique de
» diverses questions, à cause de leurs qualités objectives.
» Mais, si l'on veut s'en servir pour faciliter la résolution
» de questions spéciales, on est amené à représenter un
» nombre considérable de lignes dont le tracé, laborieux
» parfois, demande toujours un temps qui n'est pas en
» rapport avec l'avantage que procure l'utilisation des
» des diagrammes, surtout si l'on considère que la com-
» plication des nombreuses lignes qui s'entrecroisent em-
» brouille et rend l'utilisation des diagrammes fastidieuse,
» tout en entraînant des erreurs de lecture.

» Les abaques à transversale, au contraire, se réduisent,

Digitized by Google

» en général, au tracé de peu de lignes.... et sont, par le
» fait, d'une utilisation plus sûre et plus agréable. Par
» contre, ils ne peuvent guère servir à faire saisir les
» variations corrélatives des variables contenues dans la
» formule à représenter.

» Il résulte de cet exposé rapide que, lorsqu'on poursuit
» un but purement intuitif, on aura recours aux abaques
» à entrecroisement, mais que, lorsque le but sera de
» permettre la solution graphique d'une relation algé-
» brique pour certaines données numériques, on devra
» recourir aux abaques à alignements, d'un tracé si simple
» et d'un usage si facile. »

L'application de ces remarques permettra de choisir judicieusement, dans chaque cas, la catégorie d'abaque à adopter.

DEUXIÈME PARTIE.

Application des abaques a l'électricité.

Nous avons parcouru la première partie de notre programme, qui consistait à examiner quelques types d'abaques; nous avons appris avec quelques détails la manière de les construire.

Il nous reste à rechercher s'il est possible et avantageux d'appliquer à l'électricité ces procédés de calcul.

Nous croyons pouvoir répondre à cette question par l'affirmative et, afin de vous faire partager notre conviction, nous avons fait l'application des procédés nomographiques à des questions d'électricité choisies dans des applications assez diverses.

L'exposé de certaines d'entre elles persuadera, sans doute, de la souplesse des méthodes et des avantages qu'elles permettent de réaliser.

Digitized by Google

Projet de ligne de tramway.

Plusieurs des opérations à faire au cours d'un tel travail se prêtent à être traduites en abaques.

En principe, l'usage des abaques est particulièrement avantageux pour traduire des formules d'un emploi fréquent dans le projet. Or, on n'ignore pas que ce cas se présente d'une manière remarquable dans le cas qui nous occupe.

Nous savons comment on peut procéder pour établir un projet de ligne de tramway électrique ; on considère d'abord le profil en long de la voie et on le subdivise en tronçons ayant chacun une pente uniforme, ou bien se limitant aux points d'arrêt, aux courbes, etc.

Puissance.

Pour chacun de ces tronçons, on recherche la puissance mécanique à développer pour obtenir le mouvement des trains à des allures constantes que l'on se fixe, et, en régime variable, aux démarrages.

En régime permanent, on fait usage de la formule :

$$P = \frac{(f + i)\, p\, V}{0,102} \text{ watts,}$$

où f est le coefficient de frottement,
i (positif ou négatif) la pente,
p le poids du tram,
v la vitesse.

Cette formule, à appliquer successivement à chacun des tronçons, se traduit en un abaque (fig. 12) d'une façon commode. Il suffit de la décomposer en posant :

$$\alpha = f + i$$
$$\beta = \alpha V$$
$$P = \frac{\beta p}{0,102}$$

Digitized by Google

et ces trois formules donnent naissance à trois abaques successifs.

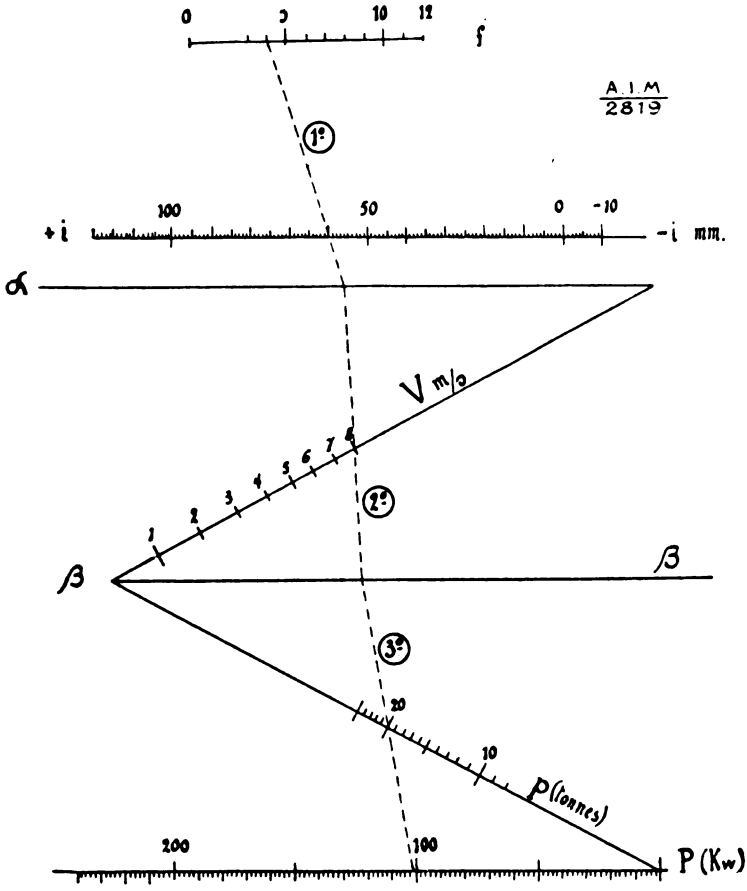


Fig. 12.

On pourrait s'étonner de ce que l'échelle de *i* ne se prolonge pas également dans la partie négative comme dans la partie positive, ce qui semblerait rationnel puisque les pentes positives, dans un voyage *aller*, deviennent

Digitized by Google

nécessairement négatives pour le voyage *retour ;* mais il faut remarquer que des valeurs négatives de la puissance ne nous intéressent en général pas, et par conséquent qu'il suffit de considérer i négatif dans une proportion telle que le facteur $\alpha = f + i$ ne devienne pas inférieur à o.

Le mode d'emploi de l'abaque est fort simple :

f, i, v et p sont donnés.

On part de f et i et par un alignement on obtient α ; α et v alignés fournissent β ; enfin, β et p par un dernier alignement donnent P cherché.

Nous savons que, possédant les valeurs de P, tenant compte des rendements de transmission et des moteurs ainsi que des courbes caractéristiques de ces derniers, on arrive aisément à déterminer le courant consommé par le train, dans chaque tronçon de la voie.

Reste à étudier la question pour les périodes de régime variable, c'est-à-dire pour les moments de démarrage.

On peut, comme on le sait, procéder en s'imposant l'accélération du train. La puissance mécanique aux essieux sera calculée par la formule :

$$P = \left[p\,(f + i) + \frac{p'}{g}\, j \right] \frac{V}{0{,}102}$$

j étant l'accélération du train
g l'accélération de la pesanteur
p' un poids virtuel du train, qui tient compte de la force vive des parties en mouvement rotatif.

Cette fois encore on est, au cours de l'étude du projet, amené à faire des applications fréquentes de cette formule.

Pour la traduire nous la décomposerons comme suit :

Digitized by Google

$$\begin{cases} \alpha = f + i & (1) \\ \beta = p\,\alpha & (2) \\ \gamma = \dfrac{p'}{g}\,j & (3) \\ \delta = \beta + \gamma & (4) \\ P = \dfrac{\delta\,V}{0{,}102} & (5) \end{cases}$$

La série des abaques se présente cette fois (fig. 13) sous une forme que nous n'avons pas encore rencontrée.

Elle provient de ce que les formules (2) et (3) n'ont aucune lettre, et par conséquent aucune échelle graphique, qui leur soit commune.

En conséquence, après avoir tracé les abaques de α et β, nous nous sommes reporté à l'autre extrémité de l'épure et y avons dessiné l'abaque de γ.

Nous sommes alors parti des échelles de β et de γ pour déterminer celle de δ qui se trouve dans leur intervalle et enfin, suivant les procédés habituels, celle de P.

On se servira donc de l'abaque de la manière suivante f, i, j, p', étant donnés :

Règle.

1) Par un alignement de f et i trouver α, aligner α et p et marquer sur le support de β le point d'intersection.

2) Se reporter à l'autre extrémité de l'épure.

Aligner p' et j. Marquer sur le support γ le point d'intersection.

3) Aligner les points marqués ci-dessus et obtenir ainsi δ.

4) Aligner δ et V ce qui fournit P.

Ces opérations peuvent se faire pour tous les temps de la période variable.

Comme précédemment, on déduit, à chaque instant, de la valeur de P, celle du courant consommé par le train.

Digitized by Google

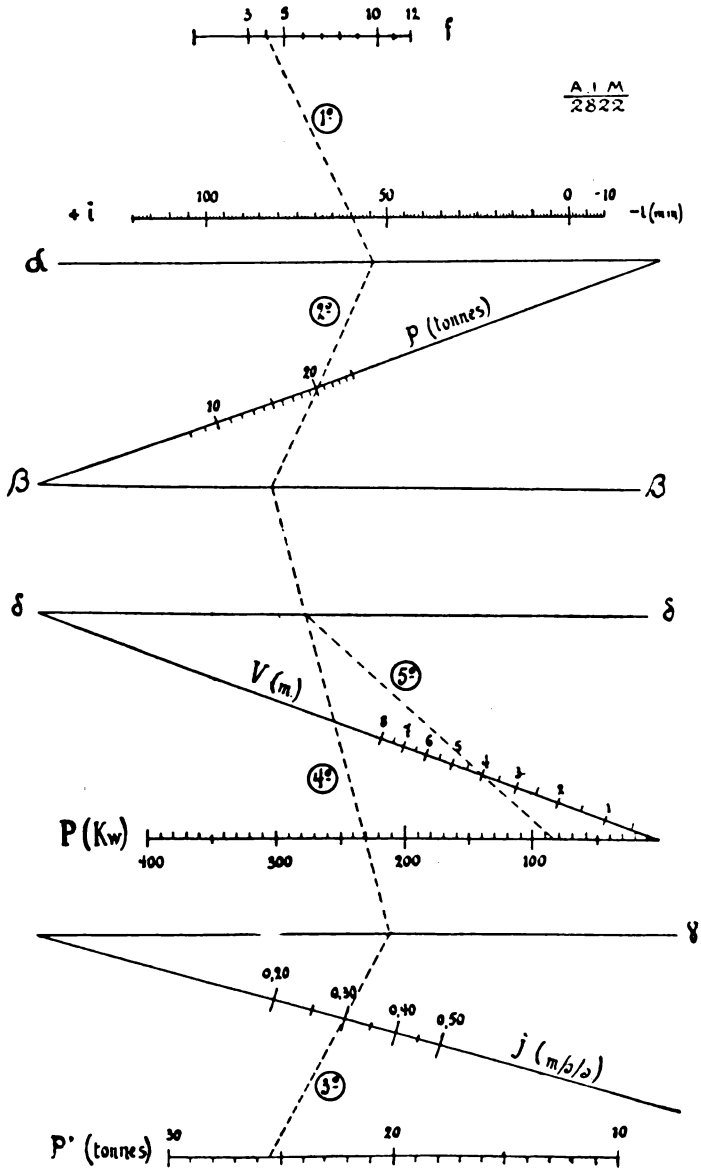


Fig. 13.

Digitized by Google

Nous savons comment la connaissance des intensités conduit au tracé de la courbe du courant à débiter par l'usine, comment on trace le graphique de marche des trains. Nous savons enfin, qu'en possession de ces divers éléments on peut fixer, de minute en minute, la position des trains et leur demande en courant.

On est amené dès lors à étudier, de minute en minute, les chutes de tension qui se produisent dans les diverses sections du réseau, limitées par les points de connection des feeders.

Répartition du courant.

Pour faire cette opération, il faut tout d'abord déterminer la répartition des courant dans les diverses régions de la section considérée, ce qui donne lieu à l'emploi fréquemment répété de formules que nous allons rappeler très rapidement.

1er *cas :* il y a un seul train dans la section considérée.

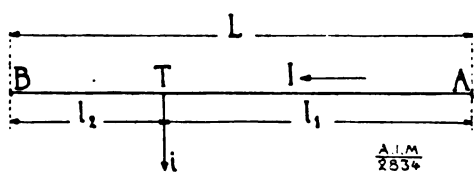


Fig. 14.

Soit I le courant (fig. 14) dans la région A T, i le courant absorbé par le train.

$$l_1 \mathrm{I} = l_2 (i - \mathrm{I})$$
$$\mathrm{I} (l_1 + l_2) = l_2 i$$
$$\mathrm{I} = \frac{l_2 i}{\mathrm{L}} \qquad (1)$$

2e *cas :* il y a 2 trains (fig. 15) dans la section. Soit I le courant dans la région centrale.

Digitized by Google

$$l_3 \mathrm{I} + l_1 (i_1 + \mathrm{I}) = l_2 (i_2 - \mathrm{I})$$
$$\mathrm{I} (l_1 + l_2 + l_3) = l_2 i_2 - l_1 i_1$$
$$\mathrm{I} = \frac{l_2 i_2 - l_1 i_1}{\mathrm{L}} \qquad (2)$$

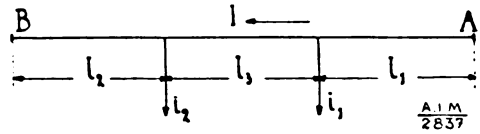


Fig. 15.

Nous n'examinerons pas les cas où les trains seraient au nombre de 3, 4, etc., dans la section.

Ils sont analogues aux précédents mais les formules sont plus longues et les abaques traducteurs par conséquent plus étendus, sans qu'ils soient d'une construction plus difficile.

Construisons d'abord (fig. 16) l'abaque de la formule (2).

Nous verrons ensuite qu'on peut en utiliser une partie pour traduire la formule (1) dont la simplicité ne justifierait du reste pas la construction d'un abaque spécial.

Posons :

$$d = l_2 i_2$$
$$\beta = l_1 i_1$$
$$\gamma = \alpha - \beta$$
$$\mathrm{I} = \frac{\gamma}{\mathrm{L}}.$$

Les formules de α et β n'ont aucune lettre commune.

Toutefois, les lettres l_1 et l_2 représentant des unités de même espèce, des longueurs, qui varient dans les mêmes limites, rien ne s'oppose à ce que nous adoptions la même échelle pour représenter ces variables.

Nous avons placé de part et d'autre de cette échelle celles qui représentent α et β. Il a fallu adopter pour la

Digitized by Google

représentation de ces deux variables des valeurs différentes des modules, bien que leur champ de variation soit analogue. Faute de cette précaution, l'échelle de γ eût été rejetée à l'infini.

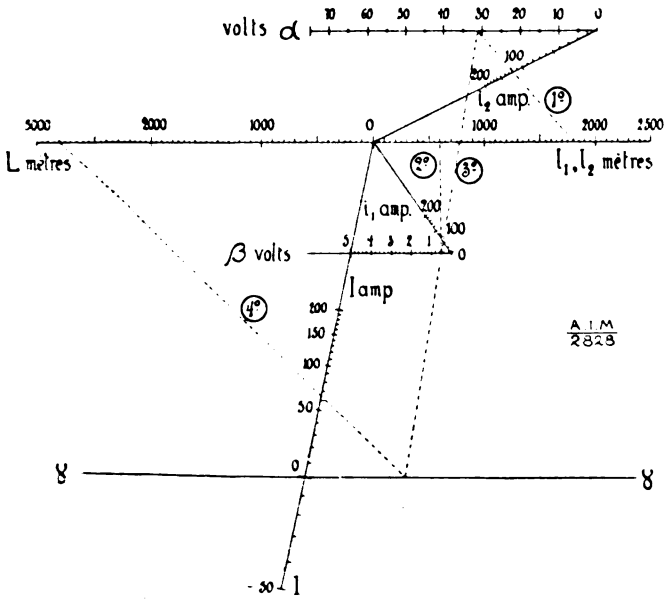


Fig. 16.

Enfin, dans un but de simplification de l'abaque, nous avons tracé l'échelle de L sur le même support que celle de l_1 et l_2, mais en sens contraire, par un souci de précision, dans le détail duquel nous ne pouvons entrer ici.

L'abaque a été étendu aux limites ci-après :

Courants de 0 à 200 ampères.
Longueur de la section de 0 à 3.000 mètres.
Longueur des tronçons de 0 à 2,500 mètres.

Il s'emploiera comme suit :

Digitized by Google

Règle.

1° Aligner l_2 et i_2 ; marquer le point d'intersection avec le support de α.

2° Aligner l_1 et i_1 ; marquer le point d'intersection avce le support de β.

3° Aligner α et β, ce qui détermine γ.

4° Aligner γ et L, ce qui fournit I.

Comme le calcul, l'abaque peut donner pour I des valeurs négatives.

Un tel résultat indique que l'on s'est trompé dans le sens attribué, *a priori*, au courant I.

Nous avons dit que la formule (1) qui fournit la répartition du courant dans le cas d'un seul train pouvait être traduite par une fraction de l'abaque qui nous occupe.

Cas d'un seul train.

Considérons, en effet, l'échelle de l_2, celle de i_2 et celle de α ;

La formule peut s'écrire :

$$I = \frac{l_2 \, i_2}{L}$$

ou

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha = l_2 \, i_2 \\ I = \dfrac{\alpha}{L} \end{array} \right.$$

La valeur de α s'obtient donc sur l'abaque comme précédemment et si nous considérons ensuite les échelles l_2 et i_2 comme représentant L et I, quantités de même espèce, il suffira d'aligner α et L pour trouver la valeur de I.

La règle d'emploi sera donc :

1° Aligner l_2 et i_2.

Marquer le point α.

2° Aligner α et L (sur l_2) — lire sur i_2 la valeur de I.

Digitized by Google

Chute de tension.

Revenons à l'étude du projet : nous avons à déterminer à présent la chute de tension dans les sections de la ligne, chute de tension provoquée par la répartition de courant que nous venons d'étudier.

Que nous soyons dans le cas de un train ou de deux trains dans la section, la formule peut se mettre sous la forme

$$e = r\, l_2\, i_2$$

dans laquelle r est la résistance de la ligne aérienne (ou de la voie) par mètre courant, l_2 et i_2 la longueur et le courant afférant à un tronçon contigu à une extrémité convenablement choisie de la section.

Nous voyons qu'à une constante près nous retombons sur la formule de la variable α dans l'abaque précédent.

Il nous suffit, par conséquent, de graduer le support de cette variable en pertes de volts.

Nous avons fait l'opération sur l'échelle de α dans l'hypothèse d'une ligne aérienne composée de deux fils de cuivre de 8 mm 25 et nous avons effectué un tracé analogue sur le support de β pour une ligne de retour formée de quatre files de rails.

On voit combien grande est la souplesse de l'abaque que nous avons construit et combien il se prête aisément à des combinaisons diverses.

On devine aussi qu'il serait aisé d'étendre nos conclusions au cas de chutes de tension dans les feeders, etc.

Nous nous arrêterons, en ce qui concerne le projet de ligne de tramway, espérant en avoir assez dit pour montrer l'aide puissante qu'y apporterait l'usage des méthodes nomographiques.

Digitized by Google

Chute de tension des alternateurs.

Proposons-nous à présent d'examiner un problème intéressant les courants alternatifs.

Considérons un générateur (alternateur ou transformateur) et désignons par f, I, la fréquence et l'intensité efficace du courant débité, par r et $\mathcal{L}$ la résistance et le coefficient de self-induction de la machine, par V_1 la force électromotrice du générateur, le déphasage du courant sur la différence de potentiel aux bornes.

Cette différence de potentiel V peut, donner lieu à la construction vectorielle que représente la figure 17.

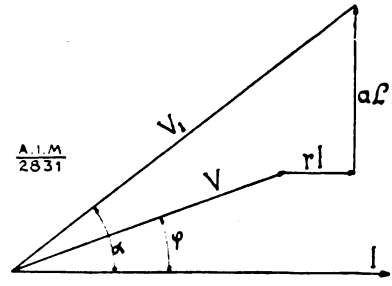


Fig. 17.

Pour obtenir analytiquement la valeur de V, il suffit d'écrire les expressions des projections de la figure sur la direction de I et une direction perpendiculaire.

On obtient :

$$V_1 \cos \alpha = V \cos \varphi + r\,I$$
$$V_1 \sin \alpha = V \sin \varphi + 2\pi f \mathcal{L}\,I.$$

On a ainsi introduit la variable supplémentaire α.

Pour l'éliminer, élevons au carré les deux expressions et faisons la somme.

Digitized by Google

Tous calculs faits, on arrive à l'équation en V suivante :

$$V^2 + \left\{ 2\,I\,(r \cos \varphi + 2\,\pi f \mathcal{L} \sin \varphi) \right\} V + \left\{ (r^2 + 4\,\pi^2 f^2 \mathcal{L}^2)\, I^2 - V_1^2 \right\} = o$$

La forme compliquée de cette équation est cause qu'il n'a pas paru possible de la traduire directement en abaque. Force est d'utiliser un artifice. Posons :

(1) $$M = 2\,I\,(2 \cos \varphi + 2\,\pi f \mathcal{L} \sin \varphi)$$

(2) $$N = (r^2 + 4\,\pi^2 f^2\, \mathcal{L}^2)\, I^2 - V_1^2$$

(3) $$V^2 + M\,V + N = o.$$

Deux abaques nous fourniront les valeurs de M et de N.

Un 3e abaque dans lequel on utilisera ces valeurs donnera enfin V.

Il convient, tout d'abord, de discuter l'équation en V, que l'on peut résoudre comme suit :

(4) $$V = -\frac{M}{2} + \sqrt{\frac{M^2}{4} - N}$$

La valeur de M est essentiellement positive, φ étant compris entre o et 90°.

Donc, le premier terme de second membre de l'équation (4) est négatif.

Comme une valeur négative de V n'aurait aucune signification, on doit éliminer le signe — placé devant le radical et il faut, en outre, que le deuxième terme soit plus grand que le premier, ce qui exige que N soit négatif.

Nous nous en souviendrons lorsque nous construirons son abaque.

Abaque de M.

La figure 18 représente l'abaque de M. Pour le construire, nous avons posé :

Digitized by Google

$$\begin{cases} \alpha = r \cos \varphi \\ \beta = 2 \pi \mathcal{L} f \\ \gamma = \beta \sin \varphi \\ \delta = \alpha + \gamma \\ M = 2 I \delta \end{cases}$$

Sans entrer dans les détails de construction des abaques partiels nous nous bornerons à indiquer le mode d'emploi :

1°) Aligner φ et r. Marquer le point de rencontre sur α.
2°) Aligner $\mathcal{L}$ et f, marquer le point sur β ;
3°) Aligner β et φ et marquer γ ;
4°) Aligner γ et α marqué précédemment. Marquer δ ;
5°) Aligner δ et I. Lire M sous le fil.

Abaque de N.

La figure 19 montre l'abaque de N.

La décomposition de la formule se fait sans aucune difficulté.

$$\begin{aligned} \alpha &= a^2 \mathcal{L}^2 \\ \beta &= r^2 + \alpha \\ \gamma &= \beta I^2 \\ \delta &= \gamma - V_1^2 \end{aligned}$$

et le mode d'emploi ne présente aucune particularité digne d'être signalée. A noter, toutefois, que nous n'avons pas tracé la partie positive de l'échelle de N, nous conformant ainsi au résultat de la discussion que nous avons faite au début de cette étude. Remarquer aussi que diverses échelles ne sont pas régulières.

Enfin, la figure 20 représente l'équation en V. Le support de l'échelle de V est une branche d'hyperbole dont l'échelle de M est asymptote.

Pour donner une idée du temps que permet de gagner l'emploi de semblables abaques, nous signalerons que la

Digitized by Google

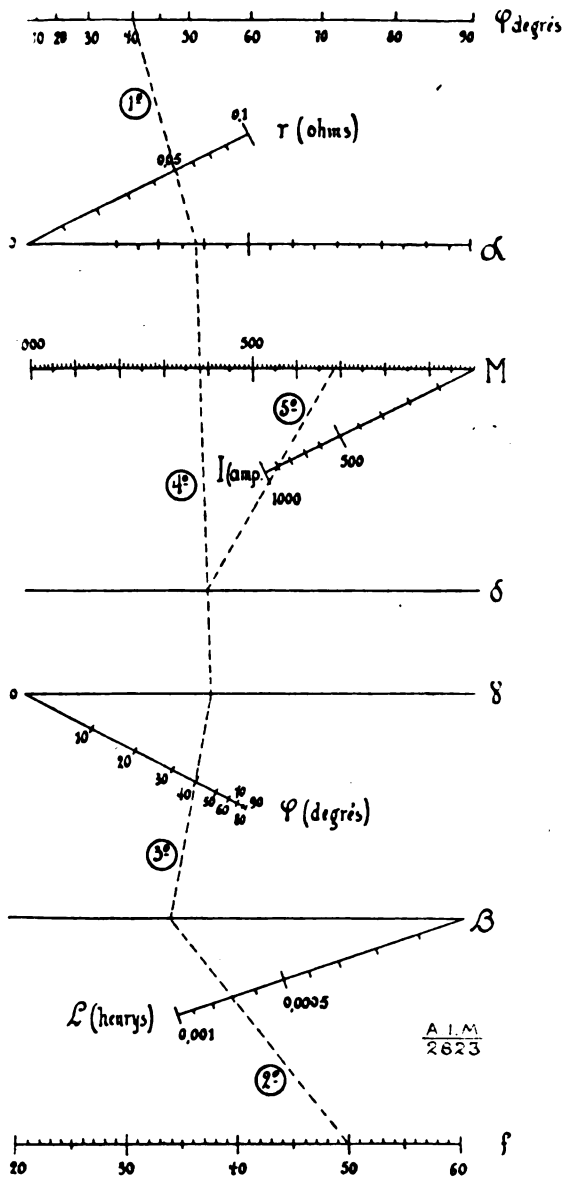


Fig. 18.

Digitized by Google

recherche d'une valeur de V, que nous avons effectuée

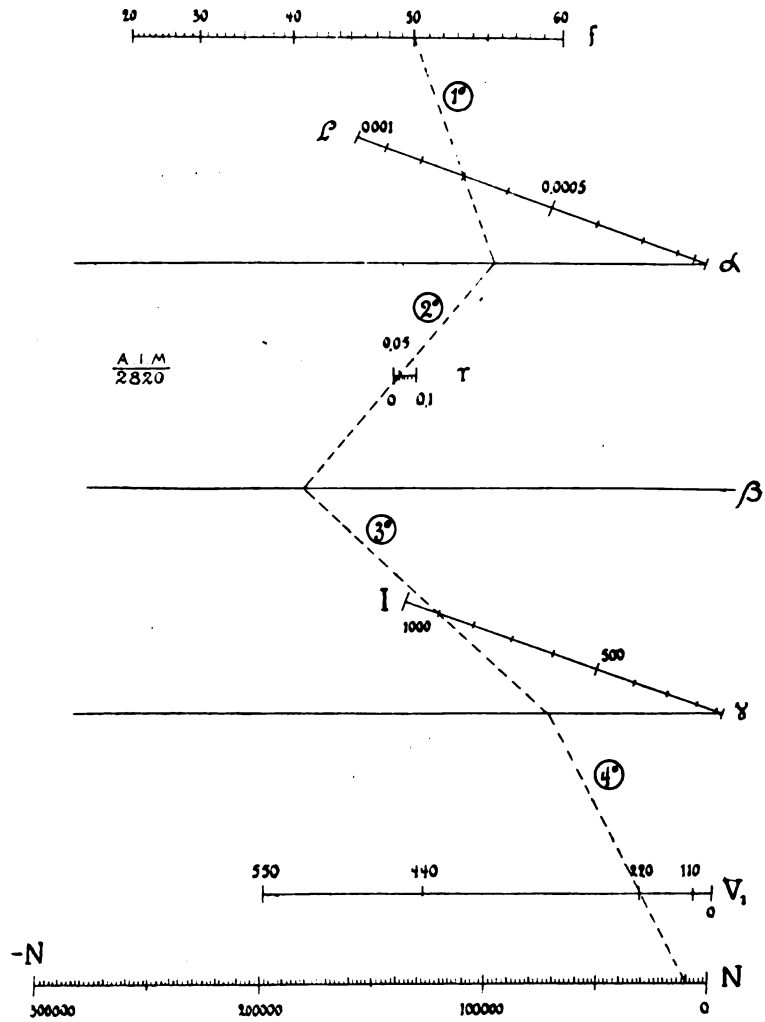


Fig. 19.

pour vérifier nos tracés, a exigé environ trois minutes.

Digitized by Google

Le calcul à la règle de la même valeur effectué, à titre de contrôle, a demandé plus d'un quart d'heure ; le rende-

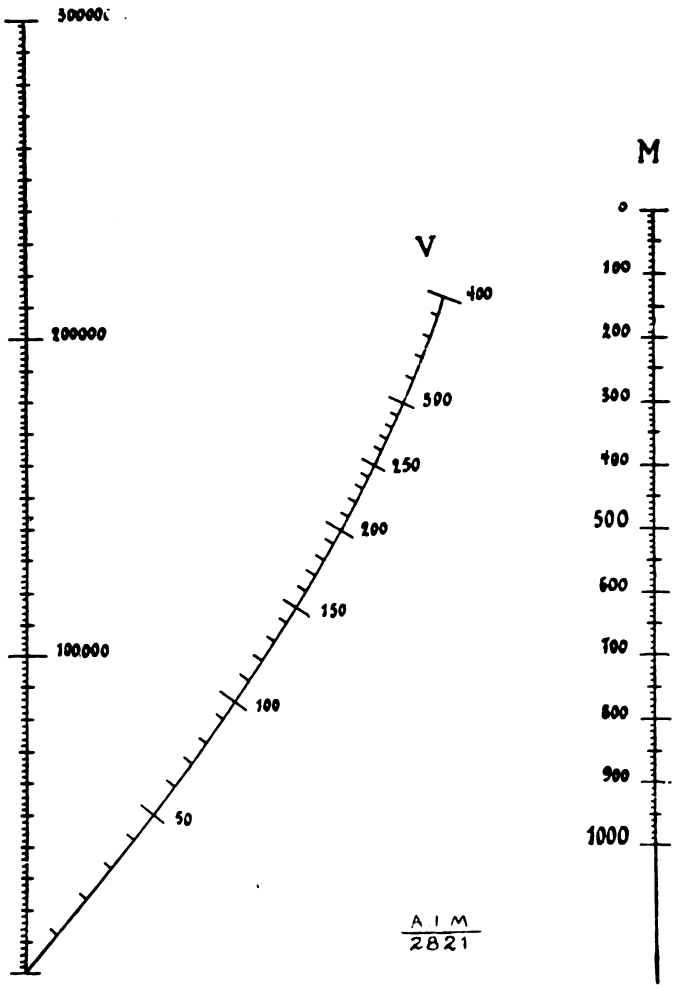


Fig. 20.

ment de l'abaque est donc plus de cinq fois supérieur à

Digitized by Google

celui du calcul direct. Nous nous accorderons tous à trouver ce résultat hautement satisfaisant.

Prix de revient du kilowatt-heure.

Je ferai à présent l'application de la traduction nomographique à un problème intéressant la partie financière de l'activité des ingénieurs électriciens.

Lorsqu'on projette d'établir une distribution d'électricité, il importe d'examiner *a priori* quelle sera le prix de revient du kilowatt-heure dans différentes hypothèses que l'on peut réaliser, de façon à choisir en pratique celle de ces hypothèses qui fournit les résultats les plus favorables.

La détermination de ce prix se fait pour une installation à vapeur par la formule :

$$x = \frac{8760 f (C k + h) p + K a}{8760 f}$$

dans laquelle

f est le facteur d'utilisation de l'installation ;
C le prix du kilog de charbon en francs;
k le nombre de kilog. consommés par kilowatt-heure ;
h les frais de graissage, matériel de nettoyage, etc. par kilowatt-heure ;
p les frais de personnel et divers par kilowatt ;
K le prix d'installation d'un kilowatt ;
a la somme du taux d'intérêt moyen à verser aux actions d'obligations et du taux moyen d'amortissement.

Cette formule peut se mettre sous la forme :

$$x = C k + h + \frac{p + K a}{8760 f}$$

et se décomposer comme suit en équations à trois variables.

Digitized by Google

$$\begin{cases} \alpha = K a \\ \beta = p + \alpha \\ \gamma = \dfrac{\beta}{8760 f} \\ \delta = C k \\ \varepsilon = \delta + h \\ x = \varepsilon + \gamma \end{cases}$$

L'abaque (fig. 21) ne présente aucune particularité que nous n'ayions déjà rencontrée. Le mode d'emploi en est le suivant :

L'alignement de K et a donne un point sur α ; ce point aligné avec p donne β ; β aligné avec f fournit γ. Marquer ce point.

A l'autre extrémité de l'épure aligner C et k, ce qui fournit un point sur δ ; ce point aligné avec h donne ε. Marquer ce point.

Aligner γ et ε. Lire le côté de l'intersection de cet alignement et de l'échelle de x.

Il est aisé, au moyen de cet abaque, de se rendre compte *a priori* de l'influence des variations des divers facteurs sur le résultat final, chose fort utile au cours de l'étude du projet.

Je clôture ici la série des applications et je termine par une dernière remarque : les abaques que je viens de présenter ne constituent en réalité que des indications : je n'oserais prétendre qu'ils soient absolument au point et que des dispositions de détail plus heureuses ne puissent être trouvées ; dans beaucoup de cas, notamment, il sera utile de détailler les graduations plus que je l'ai fait. Je me suis proposé seulement, en les construisant, de prouver que le problème de la traduction de diverses formules électrotechniques est soluble et peut conduire à des résultats avantageux.

Digitized by Google

Je pense qu'il serait hautement utile que des électriciens s'efforçassent de construire les abaques des formules

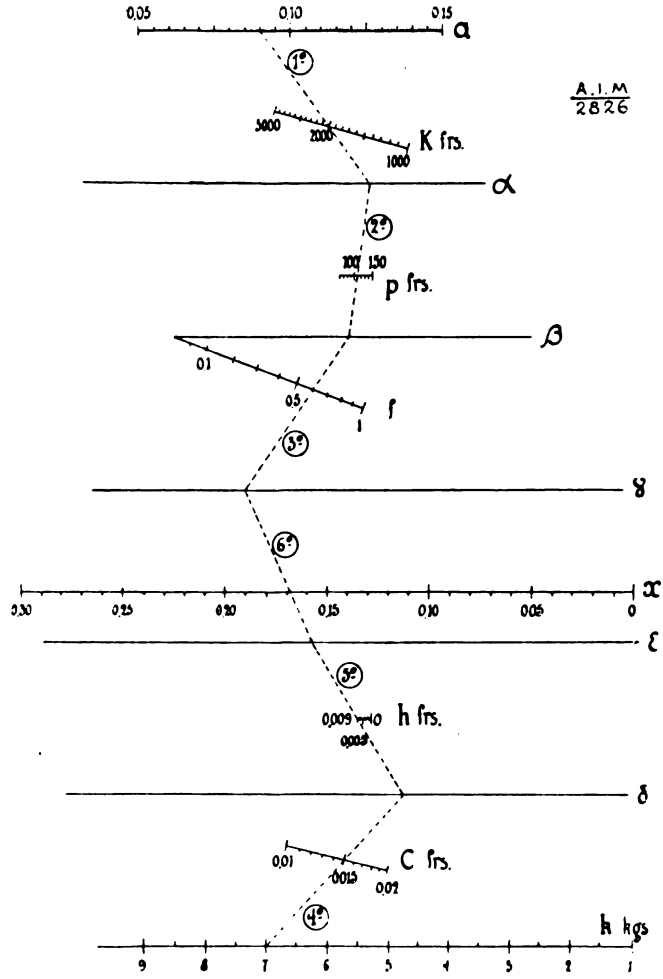


Fig. 21.

d'usage courant. Je dois cependant, à celui qui se sentirait de l'attrait pour ce genre de travail, un avis qui lui

Digitized by Google

épargnera peut-être des découragements prématurés : la construction des abaques n'est pas dépourvue de toutes difficultés ; elle entraîne de nombreux tâtonnements, elle exige souvent le calcul, point par point, de graduations étendues et demande à l'opérateur une robuste patience. Un abaque, si je puis me permettre cette comparaison osée dans une assemblée d'électriciens, un abaque dis-je c'est, en quelque sorte, un accumulateur, un accumulateur d'opérations arithmétiques. Et, de même qu'un accumulateur doit être formé par une première charge ; de même, l'accumulateur abaque doit recevoir sa charge de graduations au prix d'un certain nombre de calcul analogues à ceux qu'il épargnera dans la suite à l'ingénieur, au prix, par conséquent, d'un labeur intellectuel de celui qui le construit.

Je ne veux pas terminer cet exposé sans remercier notre Président, qui a bien voulu faciliter ma tâche en me donnant des indications très précieuses.

(Applaudissements).

M. H. Chauvin, *président,* remercie l'orateur dont la conférence, exposée avec une remarquable facilité d'élocution, captiva l'attention de l'assemblée. Il espère que cette communication incitera de nombreux camarades à utiliser les ressources des procédés nomographiques et à contribuer à étendre leur application à l'électrotechnique.

Le camarade **P. Mossay** signale l'adoption des abaques dans les bureaux d'études des firmes américaines de construction électrique, et développe quelques considérations relatives à leur répercussion sur le recrutement du personnel chargé de l'exécution matérielle des calculs.

La séance est levée à 13 heures.

Digitized by Google

CHRONIQUE.

Lord Kelvin.

92 (Kelvin)

« Le 17 décembre 1907, mourait, à l'âge de 83 ans, le très honorable *Sir William Thomson*, Baron Kelvin de Largs.

» Vouloir exposer en entier la vie et l'œuvre d'un homme qui a conquis du premier coup et conservé pendant si longtemps la première place parmi l'élite des savants, serait une tâche franchement impossible.

» Un homme doué de facultés si notoirement supérieures, qui a exercé une influence aussi considérable, ne peut être jugé à sa juste valeur par ses contemporains, si intimement qu'ils puissent l'avoir connu. Mais s'il nous est interdit de tenter l'impossible, nous pouvons, tout au moins, essayer de relater, de façon très simple, quelques épisodes de sa vie et quelques lambeaux de son œuvre.

» William Thomson est né le 26 juin 1824, à Belfast ; il était le deuxième fils et le quatrième enfant de James et Margaret Thomson. James Thomson (ou Thompson, car c'est ainsi qu'il orthographia son nom jusqu'à vingt-quatre ans) était, à cette époque, professeur de Mathématiques à la Royal Academical Institution de Belfast ; son père était un petit fermier de Ballynahinch, dans le comté de Down, en Irlande ; ses ancêtres étaient venus s'établir là vers 1641, après avoir émigré des basses terres d'Ecosse.

» En 1830, William, alors âgé de six ans, perdit sa mère. Son père ne voulut jamais envoyer ses fils dans aucune école et se chargea lui-même de leur éducation.

Digitized by Google

En 1832 (William avait par conséquent huit ans), la Chaire de Mathématiques de Glasgow fut offerte au professeur Thomson, qui quitta Belfast avec sa famille composée de six enfants. A Glasgow, il continua l'éducation de ses fils et, en 1834, William Thomson, à l'âge de 11 ans, prit ses inscriptions comme étudiant à l'Université, sans avoir fréquenté aucune école. Il se distingua immédiatement par ses progrès en Mathématiques et en Sciences physiques et, en 1840, il publia un essai sur *La forme de la Terre* qui lui valut la médaille de l'Université.

» Il étudia aussi les classiques grecs avec Lushington, les latins avec William Ramsay, ainsi que la logique et la morale. Jusqu'à la fin de sa vie, il aima à se servir de citations des auteurs classiques.

» Sa cinquième année d'étudiant à Glasgow (1839-40) fut particulièrement importante ; les leçons du professeur J.-P. Nichol et les conférences de David Thomson (parent de Faraday), chargé temporairement du cours de Philosophie naturelle pendant la maladie du Professeur Meikleham, l'orientèrent vers l'étude des Sciences physiques. Cette année-là, Thomson étudia systématiquement la Mécanique analytique de Lagrange et la Mécanique céleste de Laplace, deux travaux mathématiques de tout premier ordre ; il apprit, en outre, l'existence (événement important dans sa carrière) du remarquable Livre de Fourier *La théorie analytique de la chaleur*.

» Le 1er mai, il emprunta ce Livre à la bibliothèque du Collège. En quinze jours, il se l'était assimilé complètement. La lecture de Fourier décida, dès ce moment, de toute sa carrière. Il reprit ce Livre avec lui, pour l'étudier une seconde fois, durant un séjour de trois mois qu'il fit en Allemagne.

» Pendant la dernière année qu'il passa à Glasgow (1840-41) il adressa au *Cambridge Mathematical Journal*,

Digitized by Google

sous la signature P. Q. R., un Mémoire, *Sur les développements des fonctions en séries trigonométriques de Fourier*, où il présentait la défense des déductions de Fourier, en réfutant les critiques du professeur Kelland.

» Il quitta l'Université de Glasgow après six années d'études, sans même passer son baccalauréat et, le 6 avril 1841, il entra comme étudiant à Saint Peter's College à Cambridge. Là, bien qu'étudiant seulement, il se fit vivement remarquer; les méthodes d'intégrations difficiles qu'il employa avec une autorité incontestable et son Mémoire intitulé : *Le Mouvement uniforme de la chaleur dans les corps solides homogènes et son rapport avec la théorie mathématique de l'électricité*, le prouvent surabondamment.

» On a tant écrit sur les années que Thomson passa à Cambridge, que nous nous contenterons ici de les rappeler très brièvement.

» Il passa son « Tripos » en 1845 et sortit « Second Wrangler ». Il prit part aux régates universitaires de 1844 et gagna les rames d'argent du « Colquhoun ». Il contribua à la formation de la Société musicale de l'Université de Cambridge ; lui-même joua du cor d'harmonie dans l'orchestre.

» En quittant Cambridge, Thomson vint à Paris et travailla au laboratoire de Regnault, au Collège de France. Il y resta quatre mois, et c'est là qu'il fit la connaissance de Biot, Liouville. Pouillet, Sturm et Foucault, de qui il parle en termes admiratifs. A son retour à Cambridge, il fut nommé conférencier de Mathématiques avec un traitement annuel de 5,000 francs. A vingt-deux ans, Thomson s'était déjà acquis, par sa supériorité en Mathématiques physiques, une réputation qui ne fit que croître. Il avait déjà publié une douzaine de Mémoires.

» En 1846, la Chaire de Philosophie naturelle de

Digitized by Google

Glasgow étant devenue vacante, par suite de la mort du professeur Meikleham, Thomson, âgé de vingt-deux ans, fut choisi pour l'occuper. Son père, le professeur James Thomson (qui mourut en 1849), était titulaire de la Chaire de Mathématiques, le professeur Thomas Thomson, titulaire de celle de Chimie, tandis que le professeur Allen Thomson occupait la Chaire d'Anatomie. William Thomson était le plus jeune des cinq professeurs Thomson professant alors à Glasgow. Il choisit pour sujet de thèse inaugurale *De Motu Caloris par Terræ Corpus.*

» Cette chaire, il ne la quitta qu'en 1899, après un service ininterrompu de cinquante-trois ans.

» Ses conférences vibrantes d'enthousiasme lui gagnèrent l'amour et le respect de tous les étudiants, de ceux même qui étaient incapables de suivre ses fréquentes envolées dans le domaine le plus secret de la Physique mathématique. Il exerça sur ses élèves zélés une influence telle qu'il leur inspira presque une passion pour la Philosophie naturelle, et cette influence s'étendit graduellement bien au delà des limites de sa propre Université.

» Les quelques années qui suivirent furent remplies par un travail ardent, fécond en résultats. A la fin de 1850, à l'âge de vingt-six ans, il n'avait pas fait paraître moins de cinquante Mémoires, la plupart d'un caractère mathématique très élevé, dont plusieurs en français. Parmi ces travaux, se trouve une remarquable série dont l'origine remonte à sa participation au meeting de la British Association de 1847.

» Mais un événement plus considérable fut le commencement, à cette réunion, de son amitié avec Joule, un brasseur de Manchester, secrétaire honoraire de la Manchester Literary and Philosophical Society, qui, pendant plusieurs années, s'était livré à des recherches sur les relations entre la chaleur, l'élasticité et le travail méca-

Digitized by Google

nique. Le document que Joule présenta à cette réunion sur l'équivalent mécanique de la chaleur n'aurait pas été pris en considération, ni même discuté, si l'attention n'avait été attirée par les intelligentes remarques et observations d'un certain jeune homme, William Thomson, qui deux années auparavant avait marqué son passage à l'Université de Cambridge d'une façon particulièrement brillante.

» Bien que, au début, n'appréciant pas à sa juste valeur la portée d'un tel sujet, Thomson se jeta cœur et âme dans la nouvelle et étrange doctrine, à savoir : « Que la chaleur et le travail sont mutuellement convertibles, » pendant les six ou huit années qui suivirent, soit seul, soit en collaboration avec Joule, il employa les ressources uniques de sa puissante intelligence à démêler ces relations réciproques.

» La précision numérique était la caractéristique de l'esprit de Thomson; il devait incessamment mesurer, il devait incessamment peser afin de poursuivre ses calculs.

» Il fit un jour la remarque suivante : « Je dis souvent que lorsque vous pouvez mesurer ce que vous énoncez et l'exprimer en nombres, vous connaissez votre sujet; lorsque vous ne pouvez pas le mesurer, lorsque vous ne pouvez pas l'exprimer en nombres, la connaissance que vous avez de votre sujet est maigre et insuffisante. Cela peut être le commencement de la connaissance, mais ces notions ne méritent pas le nom de *Science*, quel que soit le sujet. »

» Même avant sa première entrevue avec Joule, en juin 1847, il communiqua à la Société philosophique de Cambridge un Mémoire sur l'*Échelle thermométrique absolue basée sur la théorie de Carnot relative à la puissance motrice du feu* (titre de l'Ouvrage de Carnot) *et calculée d'après les expériences de Regnault.* Dans ce Mémoire il se posa cette

Digitized by Google

question : Existe-t-il quelque principe sur lequel on puisse baser une échelle thermométrique absolue ? Il parvint à cette réponse : qu'une telle échelle peut être obtenue en fonction de la théorie de Carnot, chaque degré de température étant déterminé par la production d'une même quantité de travail en laissant l'unité de quantité de chaleur se transformer de manière à s'abaisser de cet écart de température. Ce résultat donne comme zéro absolu de la température le point — 273° de l'échelle du thermomètre à air. En 1849, il élabora un nouveau Mémoire sur *La théorie de Carnot* et donna une table des *valeurs de la fonction de Carnot* de 1° C. à 231° C. Joule, écrivant à Thomson en décembre 1848, lui suggéra que probablement les valeurs de la *fonction de Carnot* deviendraient la réciproque des températures absolues si elles étaient mesurées avec un thermomètre parfait : conclusion énoncée indépendamment par Clausius en février 1850. Indépendamment de Joule, Mayer et Helmholtz étudiaient les mêmes problèmes d'un point de vue plus général. La fameuse publication d'Helmholtz en 1847, *Die Erhaltung der Kraft : La conservation de la force* (signifiant ce que nous appelons maintenant *énergie*), était principalement attaquée par la proposition, basée sur le rejet de la possibilité du mouvement perpétuel : que dans toutes les transformations la somme totale des énergies reste constante.

» Entre les années 1851 et 1854, Thomson, dans une longue Communication à la Royal Society d'Édimbourg, formula avec précision les deux grandes lois de la Thermodynamique : 1° la loi de l'équivalence de Joule ; 2° la loi de transformation qu'il attribua généreusement à Carnot et à Clausius. Thomson n'envia jamais la gloire que les découvertes donnent à leurs auteurs. Il écrivait à ce sujet : « Les questions de priorité personnelle, quelque intérêt qu'elles puissent présenter aux personnes qu'elles

Digitized by Google

concernent, sombrent dans l'insignifiance, devant l'avantage d'obtenir un plus grand éclaircissement des secrets de la nature. »

» Thomson n'a jamais fait aucun usage de la conception de l'*entropie* introduite par Clausius. En 1855, il introduisit la conception plus vaste de l'*énergie utile*, qui est la base des développements ultérieurs de la Thermodynamique.

» En 1852, à l'âge devingt-huit ans, William Thompson épousa Margaret Crum et résigna son « Fellowship » de Cambridge. Le bonheur de sa vie était cependant obscurci par la santé précaire de sa femme, obligée de faire des séjours à l'étranger à diverses reprises. Ils passèrent l'été de 1855 à Kreutznach, d'où Thomson écrivait à Helmholz, pour l'inviter à venir en Angleterre en septembre, afin d'assister au meeting de la British Association à Glasgow. Il assurait Helmholtz que sa présence serait un des événements les plus intéressants de la réunion, ajoutant qu'il espérait donc le voir pour ce motif, mais aussi parce qu'il désirait ardemment faire sa connaissance. depuis le jour où il avait lu *La conservation de la force*. Helmholtz quitta donc Königsberg pour Kreutznach, dans le but de faire la connaissance de Thomson, avant de s'embarquer pour l'Angleterre. Le 6 août, il écrivait à Mme Helmholtz que Thomson lui avait produit une impression profonde : « Je m'attendais à trouver l'homme qui est un des premiers mathématiciens et physiciens d'Europe, quelque peu plus âgé que moi ; aussi, quel ne fut pas mon étonnement quand je vis se présenter à moi un homme très jeune, excessivement blond, et gracieux comme une jeune fille. Il m'avait fait préparer une chambre, il fit prendre mes bagages à l'hôtel pour les apporter chez lui. Il est à Kreutznach, à cause de la santé de sa femme. Elle fit une courte apparition dans la soirée ; c'est une personne charmante et fort intelligente ; mais de fort mauvaise santé.

Digitized by Google

Lui surpasse de beaucoup en intelligence, en lucidité d'esprit, en mobilité de pensée, tous les grands hommes de science que j'ai connus personnellement, si bien que, souvent, je me faisais l'effet d'un lourdaud à côté de lui. »

» Faraday et Riess avaient observé que, dans certains cas, les gaz produits par la décharge d'une étincelle dans une masse d'eau consistaient en un mélange d'oxygène et d'hydrogène. Helmholtz avait conjecturé que, dans ces cas, l'étincelle était oscillatoire. Thomson se proposa de rechercher mathématiquement la nature du mouvement d'électricité produit après contact dans un circuit, sous certaines conditions et à un instant donné. Il fonda sa solution sur l'équation de l'énergie, en posant l'équation différentielle et fournissant l'intégrale. Le résultat fut des plus remarquables. Il découvrit qu'une relation critique se présentait, lorsque la capacité dans le circuit était égale à quatre fois le coefficient de self-induction, divisé par le carré de la résistance. Lorsque la capacité était inférieure à cette valeur, la décharge était oscillatoire et passait par une série alternative de maxima et de minima, avant de mourir. Lorsque la capacité était supérieure à cette valeur, la décharge n'était pas oscillatoire ; elle mourait sans changer de sens.

» Ce beau morceau d'analyse mathématique, qui passa presque inaperçu à l'époque, est le point de départ de la théorie des oscillations électriques étudiées postérieurement par Oberbeck, Schiller, Hertz et Lodge ; c'est lui qui constitue la base de la télégraphie sans fil. Feddersen, en 1859, photographia ces étincelles oscillatoires et en envoya des photographies à Thomson, qui se fit un grand plaisir de traiter ce sujet en conférence, à la Société philosophique de Glasgow.

» Au meeting de la British Association à Édimbourg, en 1854, Thomson donna lecture d'un Mémoire sur : *Les*

Digitized by Google

antécédents mécaniques du mouvement, de la chaleur et de la lumière. Partant de généralités, devenues familières de nos jours, mais nouvelles à cette époque, sur l'énergie potentielle et l'énergie cinétique et sur l'idée de magasins d'énergie, l'auteur arriva à la source de la chaleur solaire et de l'énergie du système solaire ; il revint à l'argument favori de Fourier : « Si l'on remonte aux origines, on doit parvenir à un commencement qu'on ne peut ramener à aucun antécédent. »

» Les procès-verbaux de la Société royale de Grande Bretagne, de 1854, contiennent les recherches faites sur les câbles, sous le titre : *La théorie du télégraphe électrique.* Faraday avait prédit qu'il y aurait un retard dans la transmission des signaux par les câbles, retard dû à la couche de gutta-percha fonctionnant comme le verre de la bouteille de Leyde. Posant l'équation différentielle et appliquant l'intégration de Fourier, Thomson déduisit que le temps nécessaire à un courant pour atteindre, à une distance déterminée, une fraction fixe de sa valeur constante, serait proportionnel à la fois à la résistance et à la capacité ; et comme celles-ci sont proportionnelles à la longueur du câble, le retard serait proportionnel au carré de la longueur. C'est la fameuse loi des carrés, qui souleva tant de discussions. Il la fit suivre d'une recherche nouvelle sur l'*induction péristaltique des courants électriques* communiquée à la British Association en 1855 et plus tard, sous une forme plus mathématique, à la Société royale.

» L'épisode du câble de l'Atlantique, ceux de l'insuccès de 1857 et du succès de 1858 ont été si souvent relatés, qu'il est inutile de les mentionner à nouveau ici. Après l'insuccès de la première entreprise, Thomson fut appelé à prendre une part beaucoup plus active aux travaux. De la part qu'il prit à la pose des câbles en 1865 et 1866, il

Digitized by Google

suffit de dire que, pendant toute la durée des opérations préparatoires des essais préliminaires, de la traversée interrompue de 1865 (quand 1000 milles furent perdus), du voyage plein de succès de 1866 (quand un nouveau câble fut posé et que le câble perdu fut retrouvé et complété), ce fut Thomson qui sans cesse gouverna, régla, décida tout ; de qui on s'empressait de prendre et de suivre les avis.

» A son retour, il fut fait chevalier par la Reine Victoria. Il avait, dans l'intervalle, apporté des perfectionnements nouveaux, en collaboration avec Cromwell Varley. En 1867, il fit breveter le Siphon-recorder et, en collaboration avec Fleeming Jenkin, le Curb-transmitter. Dès ce moment, on ne manqua jamais de le consulter pour tous les projets de câbles sous-marins. Avec Varley et Jenkin, comme ingénieurs conseils, il fonda une association professionnelle qui fut fort profitable.

» Quand, en 1861, Sir Charles Bright et M. Latimer Clark proposèrent les noms de : *Ohm, Volt* et *Farad* pour les unités pratiques basées sur le système absolu C. G. S., William Thomson leur apporta, de tout cœur, son appui ; c'est sur son initiative que fut formé le fameux Comité des étalons électriques de la British Association qui, chaque année, apporta de si nombreux perfectionnements aux étalons et méthodes de mesures électriques. C'est à son plaidoyer en faveur de ce système d'unités que nous devons son adoption par le célèbre Congrès de Paris de 1881, Congrès auquel Helmholtz, Mascart et Werner von Siemens prirent une part prédominante (et dont le Secrétaire était Éric Gerard). Avocat fervent du système métrique, il ne perdait jamais l'occasion de dénoncer l'absurde ridicule, le temps perdu, les chinoiseries du système anglais des poids et mesures.

» Faraday et Fourier avaient été les héros de la jeunesse

Digitized by Google

enthousiaste de Thomson. Tandis que les vieux mathématiciens secouaient la tête devant la notion hérétique de Faraday sur les lignes de force curvilignes, Thomson avait, en 1849 et 1850, développé, avec toute l'élégance d'un disciple mathématicien de Poisson et Laplace, une nouvelle théorie traitant les distributions solénoïdales et lamellaires, à l'aide de l'équation hydrodynamique de continuité. C'est à Thomson que nous devons les termes : *perméabilité* et *susceptibilité*, aujourd'hui si familiers dans l'étude des propriétés magnétiques du fer et de l'acier. Il fournit également beaucoup d'autres termes actuellement adoptés : tels que *thermodynamique* et *énergie cinétique*.

» Pendant l'hiver de 1860-61, Thomson fut victime d'un grave accident, dont il garda une légère claudication toute sa vie. C'est à cette époque qu'il travailla avec son ami, le Professeur P. G. Tait, d'Édimbourg, à la publication d'un Manuel de Philosophie naturelle, à l'usage de leurs étudiants. Ils avaient projeté de traiter toute la Physique ; mais, faute de temps, ils ne purent dépasser le premier des quatre Volumes en projet. Dans ce Volume, ils ne traitèrent que la Dynamique, en y comprenant l'élasticité et tout ce qui s'y rattache.

» La première partie du Manuel de Philosophie naturelle de Thomson et Tait parut en 1867, et la deuxième en 1874 seulement. Cette publication fit changer les bases de l'enseignement de la Dynamique et provoqua une révolution dans les manuels de Philosophie naturelle. Les contributions de Thomson à la théorie de l'élasticité ne sont pas moins importantes que celle qu'il apporta aux autres branches de la Physique. Il écrivit des articles sur l'élasticité et sur la chaleur pour l'*Encyclopédie britannique* de 1878. En 1867, il communiqua à la Société royale d'Édimbourg son fameux Mémoire sur les *Atomes tourbillons* (*Vortex atoms*). Helmholtz avait publié un Mémoire

Digitized by Google

mathématique sur les équations hydrodynamiques du *mouvement tourbillonnaire* (*Vortex motion*), où il prouvait que ces tourbillons ne peuvent se produire dans un liquide totalement dépourvu de frottement interne. Thomson s'empara de cette idée.

» Si l'on ne pouvait réaliser artificiellement de tels tourbillons parfaits, l'existence d'un tourbillon de ce genre entraînerait son indestructibilité. Mais comme il est en mouvement et qu'il possède l'inertie de rotation, il serait doué d'élasticité et d'autres propriétés. Il démontra que les anneaux tourbillons (comme les anneaux de fumée dans l'air) sont stables dans un milieu parfait ; et que, dans beaucoup de cas, ils jouissent des propriétés essentielles des atomes matériels : permanence, élasticité, actions réciproques à distance à travers le milieu. Il envisageait les différentes espèces d'atomes connues des chimistes comme des tourbillons de complexité différents.

» Cependant, dans ses dernières années, il doutait que les hypothèses des atomes tourbillons suffiraient à expliquer toutes les propriétés de la matière, il n'était pas satisfait de la preuve théorique de la permanence du mouvement tourbillonnaire. Néanmoins cette conception demeurera toujours comme un témoignage de la puissance extraordinaire de son esprit.

» Lady Thomson, de qui la santé allait en s'affaiblissant depuis plusieurs années, mourut en 1870. Cette même année, l'Université de Glasgow fut déplacée du vieux collège et transférée à son emplament actuel, sur le Gilmore Hill qui domine la rivière Kelvin.

» Pendant plusieurs années, le yacht à voiles de Thomson, le *Lalla Rookh*, se fit remarquer, et Thomson était un navigateur hardi et accompli. Il avait retiré de nombreux enseignements des expériences auxquelles il s'était livré pour la pose des câbles, et en compensation il mit

Digitized by Google

toute sa science au service de la navigation. Tout d'abord, il modifia le compas des marins, par allègement des parties mobiles, pour éviter la durée trop grande des oscillations et par raccourcissement de l'aiguille afin de faciliter la correction de l'octant et des autres erreurs provenant du magnétisme de la coque du bateau. Au début, l'Amirauté fit la sourde oreille, et l'astronome royal condamna même ces inventions ; mais le nouveau compas pénétra d'abord dans la marine marchande et par la suite fut adopté dans toutes les marines du monde.

» Trouvant insuffisants les procédés grossiers usités pour le sondage (il fallait que le bateau stoppât avant de pouvoir descendre la ligne) il inventa l'appareil actuellement bien connu pour prendre les sondages en marche, en se servant d'une ligne en fil d'acier de piano. Son compas, comme son galvanomètre, son syphon recorder et autres instruments de son invention, furent construits par James White, fabricant d'appareils d'optique à Glasgow. Thomson, associé dans cette entreprise, en devint plus tard le directeur et le propriétaire. Il avait une très haute compétence pour juger le travail soigné et était un homme d'affaires des plus experts.

» La question des marées l'occupait au plus haut point, non seulement en tant que marin, mais à cause de l'intérêt qu'offre leur processus mathématique, processus en rapport direct avec les problèmes de rotation des sphéroïdes, à cause aussi de l'analyse harmonique de leurs périodes par les méthodes de Fourier et de leurs relations avec les problèmes hydrodynamiques. Il inventa un appareil prédisant la marée, prédisant pour n'importe quel port le flux et le reflux, donnés sous forme d'une courbe continue enregistrée sur papier. L'ensemble des courbes d'une année était inscrit par la machine en 4 heures. Continuant les recherches de son frère, l'ingénieux professeur James

Digitized by Google

Thomson, inventeur d'une merveilleuse machine à intégrer, il inventa, à son tour, un analyseur harmonique (le premier instrumentde ce genre) susceptible non seulement de résoudre les équations différentielles, mais permettant encore d'analyser des courbes harmoniques données, telles que les courbes des marées, et donnant les différents termes des séries de Fourier.

» Les problèmes des vagues furent toujours pour lui pleins d'attraits et il se délectait dans l'étude des travaux des mathématiciens Poisson et Cauchy sur la propagation du mouvement des vagues. En 1871, Helmholtz se rendit, avec William Thomson, aux courses d'Inveraray sur le yacht *Lulla Rookh* et ils visitèrent les Hébrides. Ils étudièrent ensemble la théorie des vagues, « théorie, disait Helmholtz, qu'il aimait à traiter comme une gageure entre nous ». Parmi les dernières publications de Lord Kelvin, parurent une série de Mémoires sur : *Les ondes engendrées par un navire en eau profonde*, communiqués entre 1904 et 1907 à la Société royale d'Édimbourg.

» Le 17 juin 1874, il épousa Miss Frances Anna Blandy, de Madère, qu'il avait rencontrée au cours de ses croisières pour la pose de câbles ; Lady Kelvin, qui lui survécut, devint le centre de son home à Glasgow et la compagne inséparable de ses derniers voyages.

» Pendant les décades de 1870 à 1890, William Thomson continuait à faire preuve d'une inlassable activité scientifique. En 1876, il visita l'Amérique, d'où il rapporta une paire des premiers téléphones d'expérience de Graham Bell.

» Au nombre des points qu'aucune notice sur la vie de Lord Kelvin ne peut passer sous silence, il faut mentionner ses polémiques avec les géologues. De trois séries d'arguments, séries indépendantes les unes des autres, il avait déduit que l'âge de la Terre ne pouvait pas être

Digitized by Google

infini et que le temps demandé par les géologues et biologistes pour le développement de la vie devait être fini. Il l'estima environ et au plus à 100 millions d'années. En vain, les naturalistes, et à leur tête Huxley, protestèrent-ils, il persista dans ses conclusions avec une ténacité absolument intransigeante, mais avec une courtoisie inlassable ; « entre chevaliers bien nés, jamais de lances rompues », disait Huxley. Son principe ne fut jamais réellement ébranlé. Mais les dernières recherches de Perry et la découverte par Strutt des quantités de matière radioactive contenue dans les roches qui constituent la terre et dont la désagrégation engendre la chaleur intérieure peuvent quelque peu modifier les conclusions de Thomson.

» En 1871, il était président de la British Association à son meeting d'Édimbourg. Dans son discours présidentiel, il émit l'idée que les germes de la vie ont pu être apportés sur la terre par quelque météore.

» L'apparition de la lumière électrique attira tout naturellement l'attention de Thomson, vers l'an 1880, sur cette branche des applications pratiques de l'électricité. Il n'eut jamais aucune prévention contre l'utilisation de la Science dans un but pratique. Il écrivait : « Il n'est pas d'erreur plus grossière que de dédaigner les applications pratiques de la Science. L'application pratique de la Science, c'est sa vie et son âme. Les grands progrès en Mathématiques n'ont été réalisés qu'à travers le désir de découvrir la solution de problèmes d'un ordre essentiellement pratique. Il en est de même en Science physique où la plupart des progrès qui ont été réalisés, depuis le commencement du monde jusqu'à nos jours, l'ont été avec le désir le plus sincère d'employer la connaissance des propriétés de la matière dans un but utile à l'humanité. »

» Les inventions brevetées de Lord Kelvin furent très

Digitized by Google

nombreuses. Sans tenir compte des brevets qu'il prit après 1900, leur nombre atteint 56, la plus grande partie sous le noms de Kelvin et de James White. Parmi ces 56, 11 ont trait à la télégraphie, 11 concernent les compas et instruments de navigation, 6 se rapportent aux dynamos et lampes électriques, 25 aux appareils de mesures électriques, 1 à la production électrolytique de l'alcali et 2 aux valves pour fluides. Il était l'inventeur indépendant de la méthode d'enroulement des alternateurs en zigzag (plus connue dans le public sous le nom de *machine de Ferranti*). Il s'intéressait même à l'invention de petits détails comme les fusibles et les poulies de suspension avec engrenages différentiels permettant de monter et de descendre les lampes à incandescence.

» Dans son discours présidentiel à la Section mathématique et physique de la British Association réunie à York en 1881, il parla de la transmission d'énergie, de l'emmagasinement de l'énergie et de la possibilité d'utiliser la force des chutes du Niagara. Il lut aussi deux Mémoires; dans l'un, il démontra mathématiquement « que, dans une machine dynamo-électrique à excitation en dérivation, le rendement maximum est obtenu quand la résistance du circuit extérieur est moyenne géométrique entre les résistances de l'armature et du shunt ». Dans l'autre il énonça la fameuse loi du rendement de lignes de cuivre pour la transmission électrique de force.

» Helmholtz, qui revint lui rendre visite en 1884, le trouva plongé dans l'étude des régulateurs et des appareils de mesure pour la lumière électrique et les tramways.

» A cette même époque, il était absorbé par les réflexions dont, un peu plus tard, la même année, il allait déverser le torrent d'une abondance merveilleuse dans les vingt fameuses conférences qu'il fit à Baltimore sur la dynamique moléculaire et sur la théorie ondulatoire de la

Digitized by Google

lumière. Ces conférences, faites à vingt et un auditeurs, professeurs des Universités américaines, furent en ce moment-là rédigées mot pour mot ; il les fit paraître en 1904 après maintes revisions et additions. Il est difficile de parler de ce travail extraordinaire qu'il accomplit à l'âge de soixante ans. Jour par jour, il guida les vingt et un maîtres émerveillés à travers le labyrinthe de la théorie de l'élasticité des solides et de la molécule dispersive, conception nouvellement inventée pour faire comprendre comment les molécules de matières sont alliées à l'éther, à travers lequel se propagent les ondes de lumière. L'extrême intérêt de ce cours provenait en partie de ce que les conférences n'avaient pas été écrites au préalable et qu'il les développait sans l'aide d'aucun programme tracé d'avance. Admis au véritable laboratoire de ses pensées, ses auditeurs furent les témoins oculaires de ses méthodes, de son étonnante puissance d'intuition, de son agilité mathématique, de son constant recours aux interprétations physiques, de son éblouissant emploi des analogies mécaniques, de son incessant appel aux images et modèles réels ou fictifs pour exprimer ses pensées. Son auditoire vit combien il pensait par lui-même ; il faisait même des découvertes au cours de ses Conférences et il goûta la surprise de constater que quelques-unes des découvertes qu'il venait de faire personnellement à l'instant avaient déjà été faites par d'autres.

» Toute sa vie, il s'est efforcé de découvrir une explication mécanique, rationnelle, des phénomènes les plus secrets de la matière : le mystère du magnétisme, les merveilles de l'électricité, les difficultés de la cristallographie, les propriétés contradictoires de l'éther, les anomalies de l'optique.

» Tandis que Thomson s'efforçait d'expliquer dynamiquement l'électricité, le magnétisme et la lumière, c'est-à-

Digitized by Google

dire de les présenter comme des propriétés mécaniques sinon de la matière, du moins de l'éther, Maxwell (le plus éminent de ses disciples) avait hardiment exposé la théorie électromagnétique de la lumière, se ralliant les suffrages de tous les jeunes qui admettaient la généralisation suivante : « Que les ondes de lumière étaient essentiellement des déplacements électromagnétiques dans l'éther ». Thomson n'avait jamais admis la théorie de Maxwell. Il est vrai qu'en 1888 il donna une adhésion nominale et, dans la Préface qu'il écrivit en 1893 sur *les ondes électriques* de Hertz, il se sert de cette phrase : « La théorie électromagnétique de la lumière ou la théorie ondulatoire des déplacements magnétiques ». Mais, plus tard, il retira son adhésion, préférant conserver l'orientation personnelle de ses pensées. Les conférences de Thomson à Baltimore, avec leur abondance en vues brillantes et ingénieuses, qui s'étendaient des problèmes les plus secrets de l'Optique aux réflexions sur la rigidité cristallique, qui étudiaient les tactiques des molécules et la grandeur des atomes, vous laissaient l'impression d'un homme parvenu à se persuader contre ses propres instincts, et qui luttait pour trouver une nouvelle expression de ses pensées, afin de conserver ses anciennes méthodes. Ces conférences, qu'il revisa et augmenta, furent publiées en un seul volume, en 1904.

» Une caractéristique de tout l'enseignement de Lord Kelvin : il affectionnait de se servir de modèles mécaniques pour éclaircir les idées obscures. Il est possible qu'il prit cette habitude de Faraday ; mais chez lui, l'emploi de ce procédé prime tous les autres. Il ne se sentait satisfait que lorsqu'il était parvenu à matérialiser ses idées dans une figure mécanique, afin de les rendre plus saisissables. On retrouve l'usage de cette représentation par des modèles mécaniques dans l'œuvre de tous les

Digitized by Google

disciples de Faraday. Maxwell, nous l'avons déjà vu, en dessina pour la Physique, Fitz Gerald conçut une remarquable représentation mécanique de l'éther. Andrew Gray en a fait un très large emploi. L'œuvre de Sir Oliver Lodge abonde en figures de toutes sortes. C'était devenu la caractéristique du genre et du tempérament des physiciens anglais ; mais aucun ne l'a possédée à un plus haut point que Lord Kelvin. Là où Poisson ou Laplace voyait une formule mathématique, Kelvin, avec la précision physique de son imagination, discernait une réalité susceptible d'être représentée rudimentairement dans le domaine concret. Et, dans toutes ses études mathémathiques, il cherchait toujours à étreindre une réalité physique. Selon le modèle que Kelvin s'est proposé, il ne suffit pas d'appliquer l'analyse pure pour l'obtention d'une solution qu'on peut ensuite calculer. « Chaque équation, chaque ligne de raisonnement mathémathique doit avoir une signification physique ; à chaque nouveau pas de ce raisonnement, doit correspondre une intuition réalisable ; l'argument entier doit pouvoir être développé en termes de physique concrets ». En d'autres termes, Lord Kelvin, mathématicien remarquablement accompli, s'est servi de son bagage mathématique, avec une suprême habileté, comme d'un instrument ; il en resta le maître, sans en devenir jamais l'esclave.

» Le premier jour de l'an 1892 apporta la nouvelle qu'une pairie du Royaume Uni avait été conférée par la Reine Victoria à Sir William Thomson. Le titre qui lui était attribué était celui de Baron Kelvin de Largs. Le nom de Kelvin provenait de la rivière *Kelvin* qui coule au pied des bâtiments de l'Université de Glasgow ; tandis que l'addition du titre *de Largs* avait trait à sa propriété de campagne de Netherhall, près de la ville de Largs, en Ayrshire, propriété qu'il fit construire en 1875 et dans laquelle il mourut.

Digitized by Google

» En juin 1896, l'Université de Glasgow célébra, par des fêtes qui durèrent trois jours, le jubilé du professorat de Lord Kelvin. A ce jubilé assistèrent un nombre considérable de savants anglais et étrangers, qui apportèrent les hommages et félicitations de toutes les Universités et Académies des Sciences du monde entier. Il résigna sa Chaire en octobre 1899, dans sa soixante-seizième année. Mais, bien qu'il cessât d'habiter à Glasgow et se fût retiré dans sa propriété de campagne de Largs, il contribua à s'intéresser de la façon la plus active aux progrès de la Science et au fonctionnement de sa fabrique d'instruments à Glasgow.

» Dans sa retraite, il concentra une grande partie de son activité scientifique sur un sujet qui le préoccupa dès 1846 et s'était présenté maintes fois à son esprit : la possibilité de formuler toutes les lois de la matière et de l'éther, dans une seule et même théorie basée sur la Dynamique. Ceci implique la conception d'un éther, non seulement susceptible de transmettre la lumière par des vibrations transverses, comme un solide élastique, mais qui posséderait une constitution telle qu'elle pût expliquer la propagation des forces magnétiques et électrostatiques et peut-être aussi l'existence de la pesanteur. La théorie tourbillonnaire de la matière était devenue insoutenable, et les problèmes de la constitution moléculaire de la matière, avec les problèmes afférents sur la structure cristalline et sur la double réfraction, firent surgir de nouvelles difficultés. Les découvertes de Crookes, suivies de celles de Hertz et de Rœntgen, amenèrent un nouvel enchaînement des idées, et toujours la vaste théorie semble aussi éloignée de lui que jamais. A son jubilé, il déclara la faillite des résultats de ses efforts les plus ardents pendant cinquante-cinq ans. S'emparant avidement de la notion des électrons ou électrions comme il les appelait, il

Digitized by Google

s'acharna à expliquer les secrets de l'équilibre moléculaire et les propriétés pyro-électriques des cristaux, et, dans les Chapitres ajoutés à ses conférences de Baltimore, il annonça qu'il avait trouvé, grâce aux électrions, une explication dynamique pour chacune des difficultés rencontrées vingt-deux ans auparavant. Ses efforts pour formuler une théorie dynamique en termes de matière et d'énergie, ou (au moyen de la théorie tourbillonnaire) en termes de matière et d'éther seulement, l'avaient amené finalement à trouver qu'il est nécessaire d'introduire une troisième notion en électricité. Il considérait la découverte du radium comme se rapportant essentiellement au sujet et il se livra lui-même à des recherches expérimentales sur les propriétés des corps radioactifs. Il faisait preuve d'une persistance inlassable et d'une activité d'esprit surprenante.

» Les honneurs s'accumulèrent sur Lord Kelvin à la fin de sa vie. Il fut président de la Royal Society de 1890 à 1894. Nommé membre de la Royal Society en 1851, la médaille Copley lui avait été décernée en 1883. Sa pairie lui fut conférée en 1892. Il fut un des premiers membres de l'Ordre du Mérite fondé par le roi Édouard VII, en 1902, il était Grand Officier de la Légion d'Honneur et titulaire de l'Ordre prussien « Pour le Mérite ». En 1902, il fut nommé Conseiller d'État. En 1904, il fut élu chancelier de l'Université, où il avait, pendant cinquante-trois ans, occupé la Chaire de Philosophie naturelle. Il était membre de toutes les Académies étrangères et titulaire de grades honorifiques de presque toutes les Universités. En 1899, il fut élu membre honoraire de l'Institution of Electrical Engineers dont il avait été président à deux reprises. Il en fut élu président une troisième fois, l'année de sa mort. En 1906, il fut élu premier Président de la Commission électrotechnique internationale, aux succès

Digitized by Google

de laquelle il porta un profond intérêt, comme le montre clairement sa dernière lettre au Bureau central, datée du 8 novembre 1907, dans le passage : « Je suis très content de ce que vous me dites au sujet des progrès généraux de la Commission électrotechnique internationale, dont les travaux sont sûrement destinés à porter des fruits utiles au monde ».

» Ses études approfondies l'avaient, à plusieurs reprises, amené à des méditations sur le commencement de l'ordre des choses, et, plus d'une fois, il professa publiquement sa croyance entière, profonde et sincère dans le Dessein du Créateur.

» Cœur bienveillant, aimable, modeste à un degré presque incroyable, il portait dans la vie l'amour le plus vif pour la vérité et un insatiable désir pour l'avancement des connaissances de la Nature. Le terre à terre des mesures précises et minutieuses constituait à ses yeux un moyen aussi honorable, pour l'avancement de la connaissance, que l'envol des spéculations les plus brillantes ou les plus abstruses. Sa supériorité dans l'emploi de ces deux procédés extrêmes n'a pas été dépassée. S'il a pu, lui-même, à la fin de sa longue carrière « déclarer la faillite » de ses propres efforts, c'est que l'idéal qu'il s'était proposé était immensément élevé. Il disait le jour de son jubilé : « Je ne sais rien de plus sur l'élasticité et le magnétisme, ou sur les relations entre l'éther, l'électricité et la matière pondérable, ou sur les affinités chimiques, que ce que je savais et m'efforçais d'enseigner à mes élèves, à mon premier cours ». Et pourtant qui de nous n'a pas appris beaucoup, touchant ces questions, grâce aux travaux de Kelvin ?

» Après avoir pris part au meeting de la British Association de 1907, à Leicester, où il entra, avec une surprenante activité, dans les discussions sur la radioactivité

Digitized by Google

et les questions connexes, il alla à Aix-les-Bains pour changer d'air. A peine avait-il rejoint son home à Largs, en septembre, que Lady Kelvin fut frappée d'une attaque de paralysie. Les souffrances morales qu'éprouva Lord Kelvin, devant cet état sans espoir de la malade, furent immenses. Il avait lui-même souffert, pendant cinquante ans, d'accès de névralgie faciale et subi, en 1906, une grave opération. Ces afflictions l'avaient visiblement vieilli et, quand éclata la maladie de Lady Kelvin, il n'avait qu'une faible résistance physique à opposer à la violence du choc. Il errait distraitement dans les couloirs de sa maison, incapable enfin de concentrer sa pensée sur son travail en train. Il fut pris de froid et, après une quinzaine de jours environ de prostration, il s'éteignit lentement et tranquillement le 17 décembre. Il fut enterré à l'Abbaye de Westminster, avec les honneurs nationaux, le 23 décembre 1907; son tombeau est à côté de celui de Newton.»

SILVANUS P. THOMPSON.

(Reproduit d'après la Notice de la Commission électrotechnique internationale.)

Digitized by Google

MÉMOIRES.

621.328 Eclairage des voitures automobiles par dynamos.

Les applications de l'éclairage électrique des voitures automobiles sont entrées dans une phase définitive.

Précédemment l'accumulateur seul était employé pour cet usage, mais l'extension donnée aux voyages rend insuffisantes les capacités des éléments utilisés pour ce genre de service.

L'adjonction d'une dynamo destinée à recharger les batteries est devenue indispensable. Seulement, pour la résolution de ce problème, on se heurtait à des difficultés qui actuellement, sont à peu près complètement résolues.

La marche très variable d'un moteur d'automobile passant de la vitesse de 600 tours à 3,000 tours, demande une génératrice dont le voltage doit rester constant par un artifice quelconque ou bien, tout au moins, cette génératrice doit se débrancher automatiquement du circuit de charge ou d'éclairage lorsque l'on peut craindre un survoltage ou un retour de courant.

L'on demande, en effet, d'assurer la constance du débit et du voltage du courant engendré, et de pouvoir débiter à l'arrêt ou aux faibles vitesses du moteur.

Lorsque la dynamo n'est plus en état de fonctionner, les accumulateurs doivent être en connexion avec le circuit d'éclairage.

Nous allons passer en revue les types des machines

Digitized by Google

qui ont été réalisés et qui semblent résoudre le problème d'une façon élégante.

La dynamo C. A. V. de la Société Glaenzer et Cie réalise la régulation sans appareillage auxiliaire.

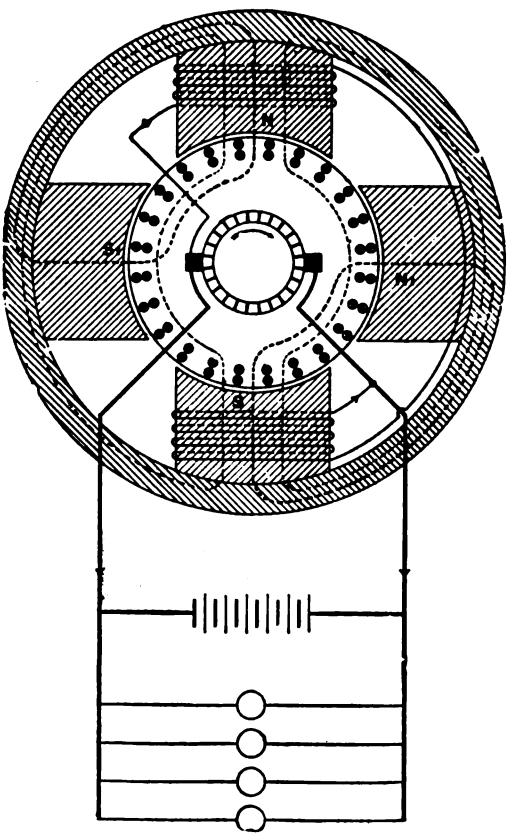


Fig. 1.

Celle-ci est assurée à toutes les vitesses par une combinaison ingénieuse des actions et réactions magnétiques.

Digitized by Google

On sait que si une dynamo reçoit le courant d'une batterie, elle fonctionnera comme moteur. Une des particularités de la dynamo C. A. V. est de permettre les retours de courant de la batterie au lieu de les arrêter par l'utilisation d'un conjoncteur disjoncteur. Ce dispositif est réalisé par un accouplement à roue libre qui permet à l'induit de tourner sous l'influence du retour de courant.

Comme, d'autre part, la consommation est à peu de chose près proportionnelle aux résistances mécaniques existant sur l'arbre de l'induit, elle sera insignifiante dans le cas de fonctionnement à roue libre, les seules résistances mécaniques étant celles de la roue libre et des roulements.

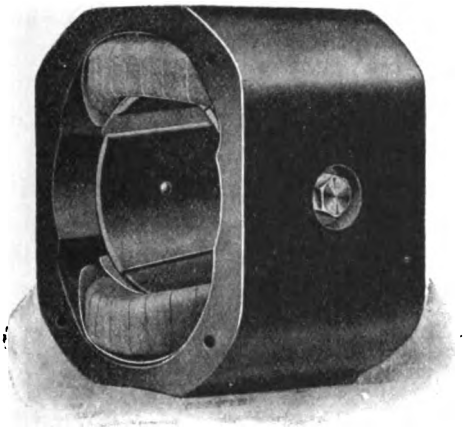


Fig. 2.

Pour les arrêts prolongés, un interrupteur sert à couper le courant, le fonctionnement à roue libre n'existant qu'en cas de ralentissement momentané, quand la voiture effectue un virage ou à la rencontre d'un autre véhicule.

La carcasse de la dynamo comporte (fig. 1) deux pôles ordinaires N et S, et deux pôles supplémentaires N_1 et S_1.

Digitized by Google

L'excitation des pôles N et S est déterminée par les enroulements en dérivation sur le circuit principal.

Le flux magnétique, quand il n'est pas dévié, traverse diamétralement l'armature d'un pôle ordinaire à l'autre et, se partageant à droite et à gauche, revient par la carcasse de la dynamo comme on l'a indiqué, en pointillé fin, à la fig. 1.

Les pôles supplémentaires (fig. 2) ne portent aucun bobinage. Le flux magnétique y est déterminé non par la réaction de l'armature entière, mais par l'action des bobines mises en court-circuit par les balais. La position de ces bobines est montrée par quatre points noirs sur la figure.

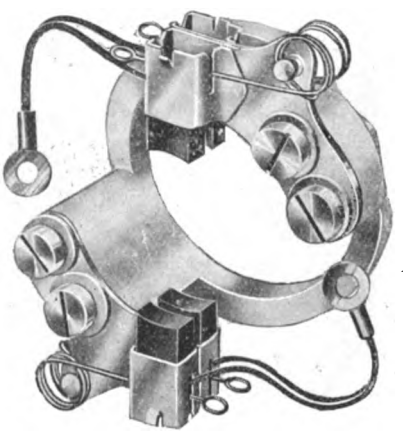


Fig. 3.

La dynamo fonctionne comme suit :

Les balais (fig. 3) se trouvent dans une position telle, par rapport aux pôles supplémentaires N_1 S_1, que les bobines qu'ils mettent en court-circuit dans la commutation ne sont pas celles qui se trouvent dans une zone magnétique neutre comme dans le cas des dynamos ordinaires, mais sont au contraire dans une zone active, où elles coupent

Digitized by Google

les lignes de force du champ créé par les pôles ordinaires N et S. Il s'ensuit que pendant cette période de court-circuit, ces courants déterminent un flux magnétique faisant un angle droit avec le flux déterminé par les pôles ordinaires. Cet effet est très augmenté par la présence des pôles supplémentaires qui diminuent la réluctance.

Il en résulte que le flux primitif est dévié et au lieu de traverser l'armature diamétralement d'un pôle ordinaire à l'autre, il passe seulement dans un quart de l'armature, suivant deux lignes à angle droit, chacune opposant seulement un quart de la carcasse, comme l'indique le trait pointillé gras de la figure.

Cette transformation du flux direct en flux dévié à angle droit est progressive à mesure qu'augmente la vitesse de rotation de l'armature.

Il se produit en même temps un autre phénomène outre la formation des courants de court-circuit qui sont limités à peu de bobines ; tout le reste du bobinage de l'armature détermine le courant à consommer qui, pris par les balais, est envoyé à la batterie ou aux lampes.

Le courant qui se développe dans le bobinage provoque une réaction d'induit qui tend à s'opposer au flux magnétique des pôles ordinaires pour réduire le flux initial, et cette action augmentant avec la vitesse contrariera la tendance qui fait croître la force électromotrice avec cette dernière, de telle sorte que le voltage restera constant.

On pourra s'en rendre compte par le diagramme de la figure 4.

Ces types de dynamos se construisent pour différents ampèrages et sont destinés à marcher à pleine charge autant que possible, de façon à utiliser la machine dans ses conditions de fonctionnement normal.

La dynamo Blériot, (fig. 5) dite « Phi », est du type cuirassé, comme la précédente. Sa carcasse inductrice en

Digitized by Google

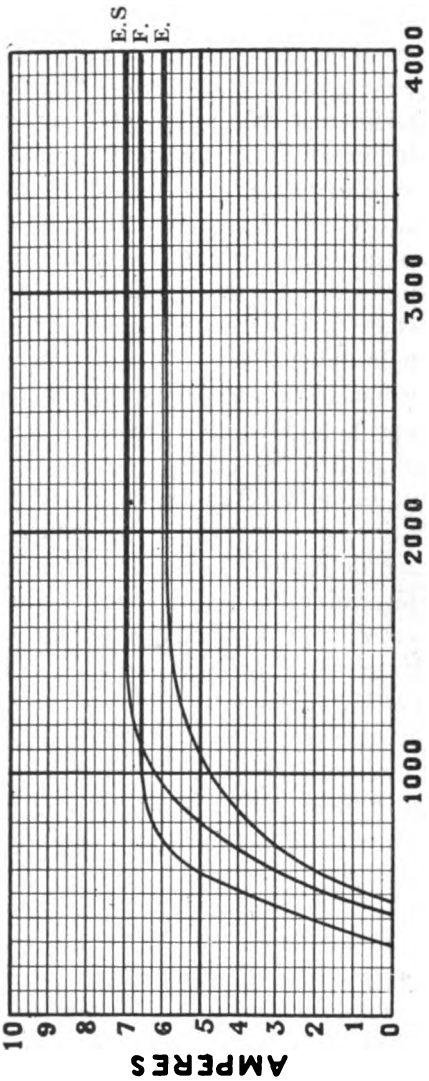


Fig. 4.

Digitized by Google

acier rapporte les deux masses polaires en tôles feuilletées, qui maintiennent elles-mêmes les deux bobines inductrices.

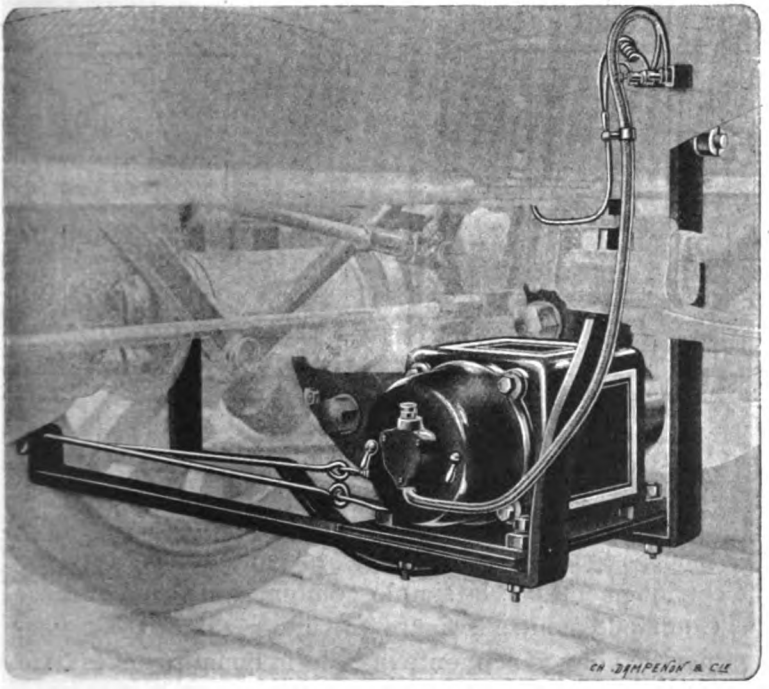


Fig. 5.

L'induit est monté sur deux roulements à billes supportés par les paliers. Chaque roulement est placé dans une cage hermétique ne laissant pas l'huile s'échapper.

Les bobines iuductrices sont composées chacune de deux enroulements, formant (fig. 6 et 7) un système compoundé.

Si l'on examine les connexions intérieures, on remarque que les inducteurs sont pourvus de bobines d'excitation normales en fil fin et que, superposé à celles-ci, se

Digitized by Google

trouve placé un deuxième bobinage parcouru en sens inverse du courant du premier par le courant d'induit.

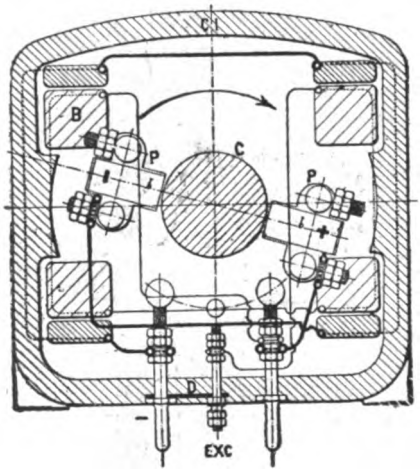


Fig. 6.

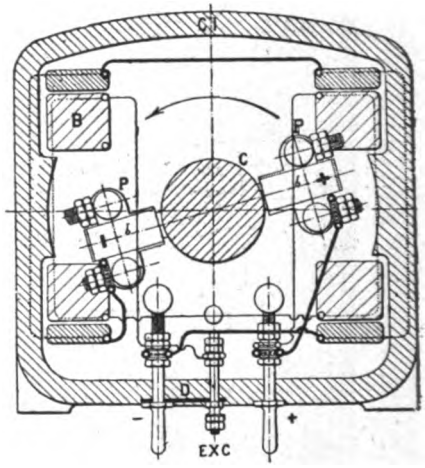


Fig. 7.

L'auto-régulation du voltage est entièrement réalisée électriquement par la simple combinaison des bobines.

Comme le montre la figure 8. l'auto-régulation est parfaite et le voltage ne monte que de la quantité nécessaire à la recharge.

Les diagrammes ont été établis en prenant le nombre de tours comme abscisses et le débit ou le voltage comme ordonnées.

La courbe A est la courbe des intensités variables avec la vitesse, mais tendant vers une constante; V est le voltage pour la recharge de la batterie lorsqu'il n'y a pas de débit et V' montre la constance du voltage quelle que soit la vitesse à circuit fermé, lorsque les phares et lanternes de la voiture automobile sont allumés.

Avec ce système de dynamo, il est nécessaire d'utiliser

Digitized by Google

un conjoncteur disjoncteur automatique, étant donné que le voltage normal n'est obtenu qu'entre des limites de vitesses déterminées quoique étendues.

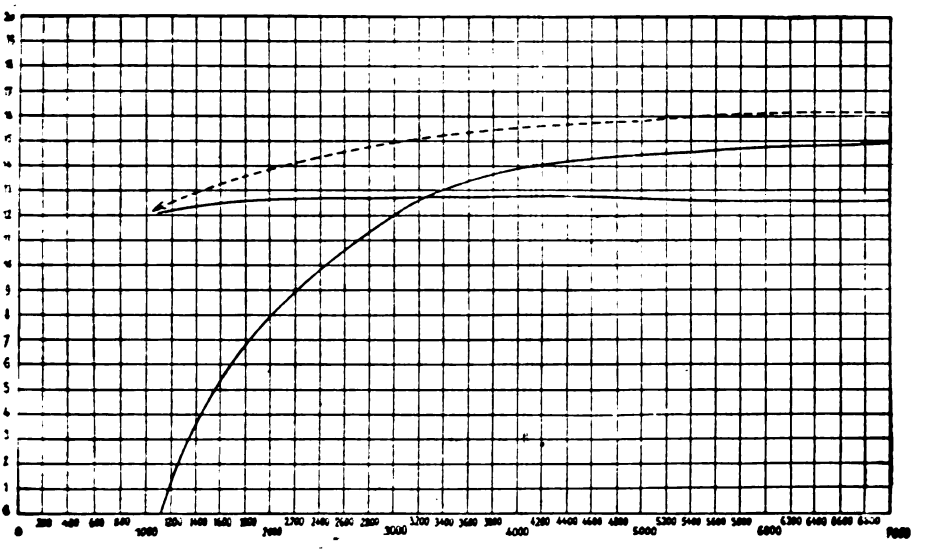


Fig. 8.

Pour toute vitesse inférieure, il est indispensable de rompre automatiquement le courant entre la dynamo et les accumulateurs, sous peine de voir la charge de ceux-ci se vider dans la dynamo.

Il est, en effet, impossible de confier le rôle du conjoncteur disjoncteur à un interrupteur à main, manié par le conducteur, car la variation de vitesse d'une voiture est trop brusque.

Le conjoncteur disjoncteur électromagnétique « Phi » est formé (fig. 9) de deux bobines magnétisantes BB en face des pôles desquelles se trouve un barreau en fer doux A supporté par une armature I qui en est solidaire. Cette

Digitized by Google

dernière peut être rappelée par un ressort G et est supportée par les colonnettes C.

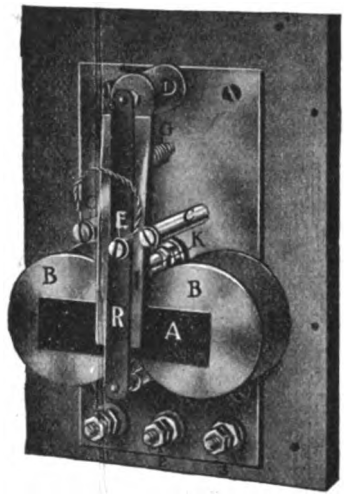


Fig. 9.

E est la borne d'amenée du courant à l'armature I par l'intermédiaire du fil F.

K est une borne sur laquelle se ferme et s'ouvre le circuit entre la dynamo et la batterie d'accumulateurs.

D est une bobine compensatrice.

L'appareil enfermé dans une boîte hermétique se compose essentiellement des éléments habituels d'un électro-aimant en fer à cheval, formé d'un barreau de fer doux et de deux bobines dont l'une est en fil fin, branchée en dérivation aux bornes de la dynamo et l'autre en gros fil branchée en série dans le circuit de charge de la batterie d'accumulateurs.

Dans la bobine shunt de l'électro-aimant se trouve intercalée au moment convenable une résistance en série qui permet d'obtenir les deux positions du collage ou de

Digitized by Google

décollage de l'armature sous des variations de tension et d'intensité aussi faibles qu'on le désire ; or, au collage, le circuit de charge de la batterie d'accumulateurs est établi et au décollage il est rompu.

Dans la position du collage, l'armature est maintenue en place par l'action magnétisante des deux bobines, de sorte que le contact est établi sous une pression proportionnelle à l'intensité du courant, ce qui est essentiel pour assurer le bon fonctionnement de l'appareil qui est soumis à des chocs.

Au décollage il ne se produit pas d'étincelle puisque la rupture est très longue et qu'elle a lieu quand le courant est presque nul ; d'ailleurs, l'appareil est muni d'un pare-étincelles.

La sensibilité du conjoncteur disjoncteur est parfaite, grâce au principe qui lui est appliqué, consistant en ce que l'effet d'une résistance additionnelle compense les variations de réluctance du circuit magnétique.

Comme nous l'avons vu précédemment, la fixité du voltage de la dynamo « Phil » reste sensiblement constant, ou plutôt elle n'augmente que de la quantité nécessaire pour maintenir constamment chargée « à bloc » la batterie d'accumulateurs.

A l'arrêt, les accumulateurs fournissant la lumière, grâce au conjoncteur disjoncteur, la dynamo « Phi » rechargera ceux-ci aussitôt que la vitesse d'entraînement sera suffisante. Lorsque le moteur est mis en marche, la dynamo commence à tourner et aussitôt qu'elle a atteint la vitesse de régime correspondante au voltage prévu, le conjoncteur disjoncteur fonctionne et branche automatiquement la dynamo sur les accumulateurs.

Lorsque, par suite d'arrêt ou de ralentissement du moteur, la vitesse tombe en deçà de la normale, le disjoncteur fonctionne et provoque le débranchement.

Digitized by Google

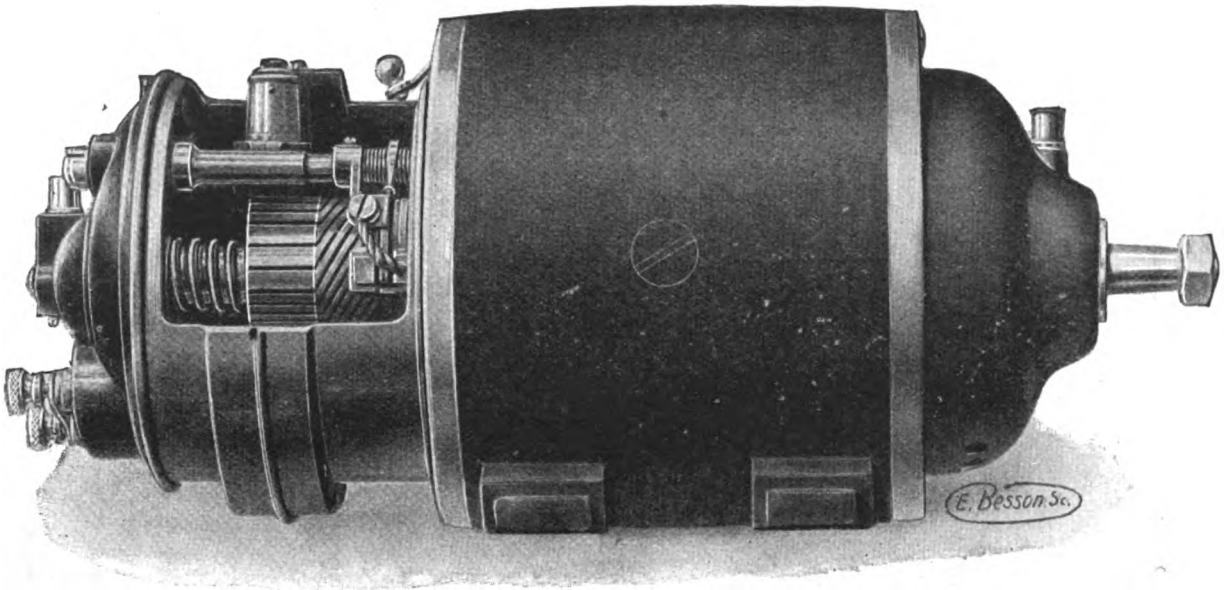


Fig. 10.

Digitized by Google

La dynamo « Stéréos » part (fig. 10) d'un principe différent des précédents.

L'induit a cette particularité qu'il est indépendant de son axe. Ce dernier est pourvu, à une extrémité, d'une vis et à l'autre d'un ressort. L'induit se dévisse librement sur cet axe suivant le jeu des attractions polaires, comme nous allons le voir, ou bien tend à se visser (fig. 11) sous la pression du ressort.

Le collecteur est formé de quatre parties : la première, qui se trouve près des enroulements, est identique à un collecteur de dynamo normale; la seconde partie est un cylindre de mica sous lequel passe le prolongement de la première partie du collecteur.

Faisant suite à ce cylindre de mica se trouve un collecteur à projections obliques qui se termine par un collecteur à lames parallèles.

Le fil inducteur est raccordé à un balai frottant sur le collecteur oblique, la dynamo étant au repos. Les balais principaux à cet instant touchent le mica et empêchent le courant provenant des accumulateurs de passer.

Si la dynamo est mise en marche, par suite de l'inertie, l'induit tend à rester décalé sur son axe, il se dévisse, effet qui est encore augmenté par suite de l'excitation et qui aspire l'induit en refoulant le ressort. L'armature se place dans une position déterminée. Sous l'effet de cette aspiration, le balai d'excitation se trouve placé sur le collecteur par décalage sur les lames obliques par rapport aux balais principaux et par ce fait provoque un champ anormal donnant l'autorégulation, étant donné que l'avancement relatif du balai est d'autant plus grand que la vitesse est plus grande.

La dynamo Stéréos débite à la plus faible vitesse, son excitation étant indépendante, atteignant son maximum aux premiers tours, puisqu'elle reçoit immédiatement le courant des accumulateurs.

Digitized by Google

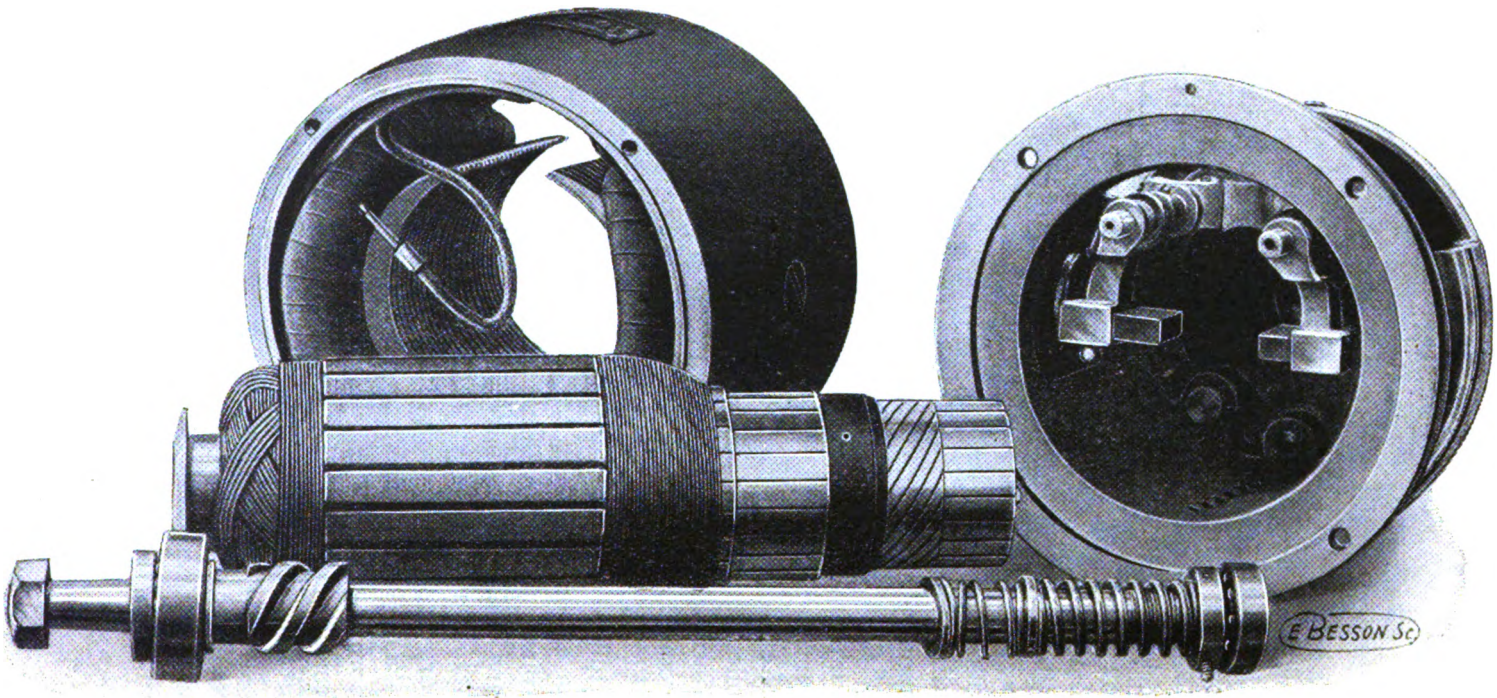


Fig. 11.

Digitized by Google

Si l'on suppose que le moteur ralentit ou s'arrête, la différence de potentiel entre la batterie d'accumulateurs et la génératrice sous le sens d'inversion du courant transforme cette dernière en motrice et l'induit se vissant aussitôt efface son collecteur des balais qui viennent reposer sur la bague isolante. La disjonction est ainsi obtenue.

Le balai d'excitation peut coulisser sur son axe, le déplacement opère une jonction variable sur le collecteur oblique, ce qui permet de régler l'ampérage et le voltage de la dynamo suivant le type de batterie utilisé.

Par exemple, le débit maximum étant 12 ampères pour 16 volts, peut être réduit jusqu'à 2 ampères, de même, la tension peut être abaissée à des valeurs plus faibles.

Les dimensions de cet engin sont de 310 millimètres de long sur 150 millimètres de diamètre. L'appareil est du type cuirassé.

L'auto-dynamo De Coster est constituée dans son ensemble comme toutes les dynamos industrielles du type cuirassé. Son induit est enroulé en tambour, son arbre est supporté par deux paliers à billes, les balais sont en charbon et s'appuient sur un collecteur en bronze dur, large et robuste.

Ce qui caractérise une installation avec l'auto-dynamo est le conjoncteur disjoncteur placé dans le socle d'un petit tableau de distribution. Cet appareil se compose d'une bobine sur laquelle sont enroulées un grand nombre de spires de fil très fin. Chaque extrémité de ce fil est reliée à un des pôles de la dynamo. La bobine contient un noyau en fer doux qu'un faible ressort tend à écarter. Sitôt que la dynamo tourne et atteint une vitesse de rotation suffisante pour que son courant puisse charger les accumulateurs, la bobine s'aimante et attire l'armature mobile, celle-ci vient reposer sur un bloc de cuivre et

Digitized by Google

établit la communication entre la dynamo et les accumulateurs. Pour renforcer cette attraction la bobine porte aussi une vingtaine de tours de gros fil à travers lequel passe tout le courant allant de la dynamo aux accumulateurs. Le contact ainsi établi persiste tant que la vitesse reste suffisante, mais dès qu'elle descend jusqu'à une certaine limite le courant qui passe par le gros fil de la bobine s'affaiblit et l'armature ne tarde pas à décoller.

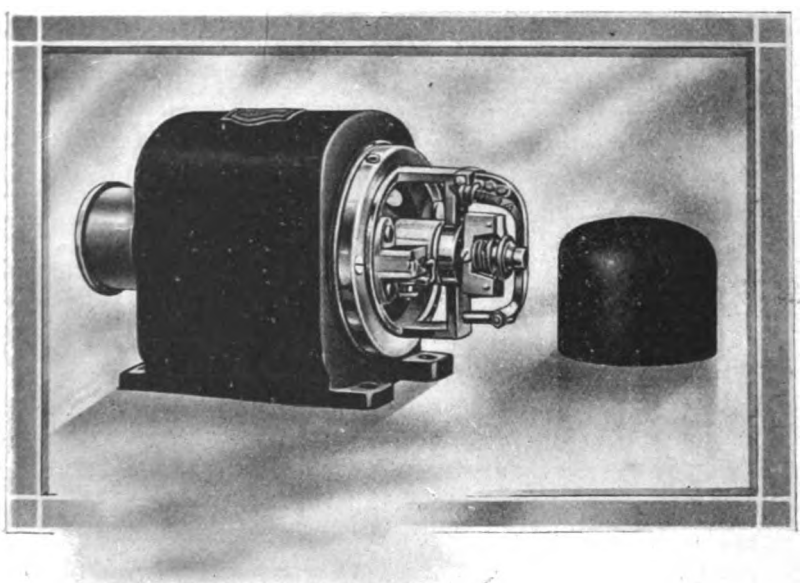


Fig. 12.

Une autre machine (fig. 12) du même auteur est la « dynamo-magnéto », dont le conjoncteur disjoncteur fait partie intégrante de la génératrice. Il est placé en bout d'arbre et protégé par un carter facilement démontable ; cet appareil se compose d'un régulateur à force centrifuge

Digitized by Google

qui déplace une came reliant la dynamo à la batterie, en formant contact par coulissage, au moment où la dynamo atteint la vitesse produisant son voltage normal.

La dynamo Willocq-Bottin est du type industriel cuirassé. Primitivement elle était accouplée à un disjoncteur automatique dont le principe mérite d'être signalé.

Monté à l'extrémité close de l'engin, en faisant de la dynamo avec le disjoncteur une unité complète, il est extrêmement simple et n'exige aucun ajustement de pièces pouvant s'user.

Un disque, calé sur l'arbre, tourne dans un bain de mercure contenu dans un récipient extérieur.

Un contact isolé est situé dans une poche d'enfoncement, de telle sorte que normalement le mercure est au repos dans le bas de la poche.

Aussitôt que l'arbre tourne, le mercure est projeté en avant par le disque, jusqu'à ce qu'à une vitesse déterminée il atteigne le contact isolé, provoquant la connexion électrique nécessaire. Quand la vitesse de l'axe tombe en-dessous du point de génération, le mercure retombe et brise la connexion.

Le disjoncteur a, de plus, l'important avantage de permettre à la dynamo d'être actionnée soit devant, soit derrière la boîte d'engrenage, car aucun contact ne se produit si la voiture va en arrière.

Actuellement, la disjonction est électromagnétique.

La dynamo Ducellier est du genre auto-régulatrice ; c'est une dynamo dont la particularité gît dans un balai supplémentaire, placé sous un certain angle convenablement choisi. Ce balai est relié à une bobine inductrice antagoniste qui provoque le déplacement de la ligne neutre, par conséquent fait varier la réaction d'induit et, par ce fait, plus la vitesse augmente, plus cette réaction

Digitized by Google

augmente et tend à faire diminuer le voltage aux bornes, qui se maintiendra constant.

Les dynamos pour automobiles sont toutes pourvues de pattes d'attache qui permettent de les fixer au châssis ou bien à des ferrures disposées pour leur donner une assise stable, sans porte-à-faux.

La commande peut se faire de différentes manières ; voici celles prévues pour la dynamo Blériot.

Elle peut être entraînée : 1° par friction sur le volant avec débrayage à volonté ; 2° par poulie et courroie ; 3° par chaîne.

Le premier de ces modes de montage est actuellement le plus communément employé ; il coûte plus cher à établir, mais il évite l'entretien de la courroie de transmission et permet le débrayage de la dynamo.

La transmission par friction s'établit, soit directement, soit par l'intermédiaire d'un arbre à cardans, suivant les dispositions générales du châssis et l'emplacement dont on dispose pour loger la dynamo.

Pour la friction directe, sur le bout de l'arbre de la dynamo est claveté un galet en aluminium dont les joues compriment une garniture en cuir ou en caoutchouc saillante de 7 à 8 millimètres. Le diamètre extérieur de ce galet dépend de celui du volant de la voiture.

La dynamo est fixée (fig. 13) sur une plaque de tôle de 4 millimètres d'épaisseur portant quatre goujons correspondant aux pattes de fixation de la machine. Cette première assise est solidaire d'une deuxième plaque de 6 millimètres et mobile par rapport à celle-ci autour d'un axe central. La deuxième plaque est fixée solidement sur deux ferrures forgées spécialement suivant chaque type de châssis. Elles doivent être fixées autant que possible aux deux longerons du châssis, de manière à éviter que la dynamo ne se trouve en porte-à-faux.

Digitized by Google

Ces ferrures sont établies au moment du montage, de façon que le galet de friction se trouve dans le plan du volant du moteur et qu'il s'applique parfaitement sur la partie extérieure de celui-ci, la dynamo se trouvant parfaitement parallèle à l'axe du moteur.

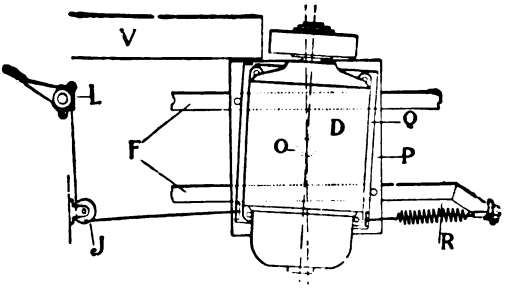


Fig. 13.

L'adhérence du galet sur le volant du moteur est assurée par un ressort de traction très puissant. Ce ressort peut être fixé d'une part, soit sur la dynamo elle-même, en serrant dans les boulons d'un palier une ferrure *ad hoc*, soit sur une oreille rapportée sur la plaque tournante, soit sous un étrier, serré sous les vis du palier de la dynamo.

Le second point d'attache (fig. 14) du ressort est pris, soit sur une petite ferrure indépendante fixée au châssis, soit sur tout autre point que l'on jugera convenable.

De ce côté, la tension du ressort est réglable, grâce à la tige filetée. On peut ainsi régler convenablement l'adhérence du galet sur le volant sans exagération et éviter d'écraser le cuir de friction.

Pour assurer le débrayage de la dynamo, il suffit d'éloigner légèrement le galet de 4 à 5 millimètres, grâce à la plaque tournante reliée à un câble d'acier de manœuvre dont la traction contrarie l'action du ressort de tension.

Digitized by Google

Sur certains châssis, les alentours du volant sont tellement encombrés qu'il est impossible de trouver un emplacement suffisant pour la dynamo. Dans ce cas, le mouvement de rotation du galet est transmis par un arbre intermédiaire.

Avec ce genre de montage, la première chose à faire est de mettre en place le galet de friction, en respectant les angles qui ont pour but d'assurer le meilleur rendement de la friction et le minimum de bruit, en évitant le broutement du galet sur le volant. L'adhérence du galet est assurée,comme dans le montage précédent, par un ressort de traction très puissant, pour éviter tout glissement. Le débrayage s'effectue comme pour la friction directe, en éloignant le galet du volant par l'action d'un câble d'acier commandé par un levier.

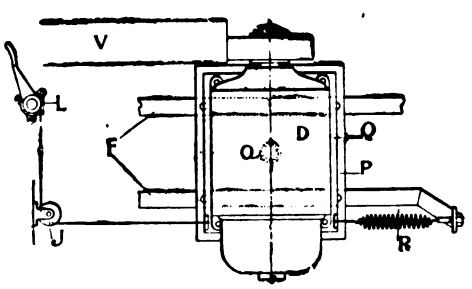


Fig. 14.

L'entraînement de la dynamo peut aussi se faire par courroie. Ce système a l'avantage de coûter un peu moins cher que la transmission par friction, mais il présente l'inconvénient de faire tourner constamment la dynamo, car il est impossible de s'astreindre à faire sauter la courroie chaque fois que l'on n'a pas besoin de lumière. De plus, la nécessité de maintenir la courroie constamment

Digitized by Google

tendue oblige le mécanicien à des soins particuliers pour rattraper l'allongement. On peut employer une courroie plate ou trapézoïdale.

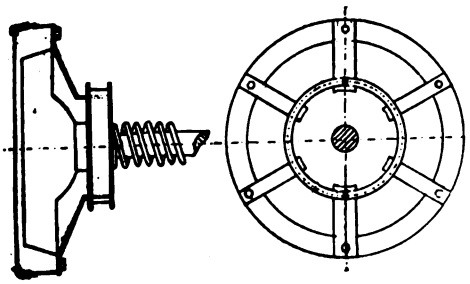


Fig. 15.

Pour effectuer un montage par courroie, il faut d'abord chercher l'emplacement convenable pour la poulie de commande. Celle-ci peut être fixée directement sur le volant et alors elle se compose, comme l'indique la figure 15, d'une couronne en fer cintrée, munie de bras qui sont fixés sur le volant. Parfois, la poulie se compose simplement d'un disque en bois convenablement claveté sur l'arbre, entre la boîte de vitesse et l'embrayage, ou bien même à l'arrière de la boîte de vitesse. D'autre fois encore on ajoute une poulie en aluminium à gorge trapézoïdale sur la poulie de commande du ventilateur.

En ce qui concerne l'entraînement de la dynamo par chaîne silencieuse du genre Renold à engrènement, ce mode de montage est encore assez peu répandu. Si, d'une part, il ne présente pas l'inconvénient signalé pour la courroie, qui a une tendance à l'allongement, d'autre part, l'inconvénient d'une rotation continue subsiste.

Comme nous l'avons fait voir incidemment, toute installation de dynamo sur voiture automobile comprend une

Digitized by Google

batterie d'accumulateurs de 8 à 16 volts, quelquefois un conjoncteur disjoncteur, et toujours un petit tableau (fig. 16) de distribution placé sur le tablier de la voiture.

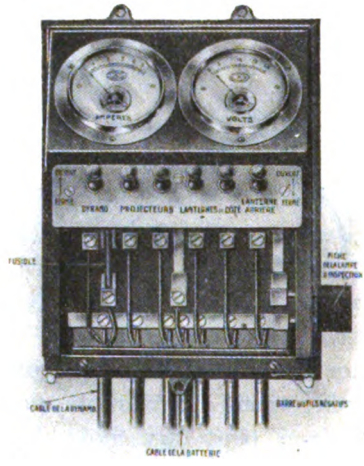


Fig. 16.

Ce dernier est généralement très réduit et comprend un ampèremètre, un voltmètre et les différents interrupteurs et coupe-circuits. Ce tableau est renfermé dans une caissette étanche.

H. Duculot.

Digitized by Google

Sur les causes des incendies de centrales électriques et leurs remèdes.

Les incendies, totaux ou partiels, de centrales électriques ont été nombreux ces derniers temps, surtout aux États-Unis et en Suisse. Cette répétition d'accidents graves qui privent des villes, et parfois des régions entières, de lumière et de force motrice pendant des temps plus ou moins longs, a conduit les exploitants de centrales à rechercher les causes de ces incendies et leurs remèdes et à tenter ainsi de diminuer leur nombre.

* * *

La plupart des centrales modernes, tant hydrauliques qu'à vapeur, sont construites en matériaux incombustibles : fer pour les charpentes ; tuiles, ardoises ou ternit pour les toits ; briques, pierres ou béton pour les murs et les planchers. Il semble donc, *a priori*, que seuls les machines et les appareils qu'elles contiennent puissent fournir un aliment au feu. Il ne faut toutefois pas perdre de vue qu'une charpente métallique exposée à un feu violent se disloque aisément par torsion des pièces qui la composent et entraîne ainsi l'écroulement de pans de murs entiers. Des gratte-ciel américains, construits en matériaux incombustibles, se sont souvent effondrés lors d'incendies intérieurs.

En dehors des tableaux de distribution, les chaufferies et les salles de machines des centrales présentent peu de causes d'incendies. Les enroulements et les câblages des machines peuvent évidemment s'enflammer, mais ces

Digitized by Google

incendies sont facilement localisés et ne produisent pas un grand développpement de chaleur. Dans les salles de machines récemment construites, un danger plus grand a été introduit par l'adoption de filtres pour purifier l'air servant à la ventilation des alternateurs. Ces filtres, composés de bandes d'étoffe tendues sur des châssis en bois, forment un excellent aliment pour le feu et s'enflamment facilement. La flamme, aspirée par l'alternateur qui joue le rôle d'un ventilateur de grandes dimensions, a bientôt fait de détruire tout le bobinage et de faire gripper, par échauffement exagéré, les paliers du groupe turbo-alternateur, ce qui provoque la destruction de la turbine. Pour éviter ces accidents très graves, il faut placer les filtres à air à une grande distance des alternateurs qu'ils protègent, dans un local spécial, particulièrement incombustible, où nul ne puisse avoir accès. Il est recommandable de fermer les prises d'air extérieur de la chambre des filtres par des treillis métalliques à mailles serrées qui diminuent les risques d'inflammation du filtre dans le cas d'un incendie extérieur à cette chambre.

Les conducteurs servant au transport de force pour les services auxiliaires et à l'éclairage de la centrale doivent être soigneusement isolés et entourés, si possible, d'une couche d'amiante. Pour les fils d'éclairage, l'appareillage sous tube métallique est à conseiller. L'isolement de tous ces circuits devra être contrôlé fréquemment.

Le transport de l'énergie des génératrices au tableau de distribution de la centrale doit s'effectuer de préférence par des barres de cuivre disposées dans des caniveaux parfaitement étanches et incombustibles. On diminuera ainsi les causes de courts-circuits qui peuvent se produire dans les câbles armés, qu'on emploie souvent pour effectuer ce transport et qui donnent lieu à des arcs de longue durée, constituant une cause d'incendie.

Digitized by Google

L'endroit des centrales le plus exposé aux incendies est le tableau de distribution où se trouvent réunies, en grand nombre, des matières particulièrement inflammables, telles que l'huile des transformateurs statiques et des interrupteurs, la masse isolante des transformateurs de mesure, le caoutchouc dont les câbles sont recouverts.

Une innovation récente dans la construction des centrales consiste à séparer complètement le tableau de la centrale et à le placer dans un bâtiment spécial et indépendant. Si le tableau brûle, la centrale est préservée et un câblage de fortune permettra de continuer l'alimentation du réseau. D'autre part, si un accident tel qu'une rupture de conduite de vapeur se produit dans la salle des machines, le tableau n'en souffre pas. Il est malheureusement impossible d'adopter cet excellent dispositif dans les centrales déjà existantes, et il faut se borner à y rendre les tableaux aussi incombustibles que possible. Si l'on emploie des transformateurs statiques, particulièrement dangereux pour l'incendie parce qu'ils constituent de véritables réservoirs d'huile, il sera très utile de transporter ces appareils dans un local spécial et isolé et de mettre les logements de chaque transformateur à l'abri d'un écroulement en les revêtant d'une chemise réfractaire. Ces logements doivent être fermés par des rideaux métalliques. Des thermomètres à contacts ou des couples thermo-électriques renseigneront le personnel électricien préposé au tableau sur la température de l'huile des transformateurs en service, et des sonneries les avertiront d'un échauffement exagéré de cette huile.

Les interrupteurs à huile des alternateurs et des départs des feeders constituent également, dans les tableaux, un élément de danger. Des diverses expériences réalisées récemment, il résulte que l'huile de ces interrupteurs prend feu de deux manières différentes :

Digitized by Google

1° *Par échauffement progressif* (en cas d'un mauvais contact aux mâchoires de l'interrupteur, par exemple) précédant la rupture de la charge normale de l'alternateur ou du feeder. Sous l'action de l'arc de rupture, l'huile, fortement échauffée, prend feu. Cette inflammation ne se produira toutefois qu'en cas de manque d'huile ou en cas d'ouvertures dans l'interrupteur, car il faut, pour produire la combustion, qu'il y ait de l'air en présence de l'huile. Les interrupteurs devront donc être bien clos et munis chacun d'un niveau d'huile très visible. On a remarqué que l'huile enflammée tendait à s'éteindre à moins qu'elle ne fût en contact avec une mèche. Il faut donc éviter, dans la construction de l'interrupteur, tout ce qui pourrait servir de mèche à l'huile enflammée et veiller surtout à ce que les câbles sortant de cet interrupteur ne soient pas recouverts de matières isolantes. La même remarque s'applique aux câbles sortant des transformateurs statiques.

Le premier mode d'inflammation de l'huile des interrupteurs pourra être facilement évité si les électriciens perçoivent l'odeur causée par l'échauffement progressif de l'huile.

2° *Par échauffement instantané.* Ce cas se présente lors d'un court-circuit coupé par un interrupteur qui n'est pas proportionné à la puissance débitée par le court-circuit.

Les interrupteurs des alternateurs ont peu à craindre à ce sujet, car seul un court-circuit entre l'alternateur et eux peut provoquer le passage vers la machine de toute la puissance débitée par la centrale, et encore ce dernier cas est-il impossible si l'on a eu la précaution d'installer aux machines des relais instantanés à retours de courant. Il en est autrement des interrupteurs de départ des feeders. En cas de court-circuit sur un feeder, l'interrupteur automatique coupe non seulement l'intensité totale du courant produit à ce moment par la centrale, mais

Digitized by Google

cette intensité multipliée par un coefficient compris entre 3 et 4. D'autre part, le développement, souvent rapide, de la puissance installée dans la centrale, n'a pas toujours coïncidé avec le remplacement des interrupteurs primitivement installés, dont la puissance aurait dû suivre ce développement. Il en résulte donc le passage, à travers ces interrupteurs, d'intensités pour lesquelles ils n'ont pas été construits, et l'échauffement instantané de toute la masse d'huile contenue dans l'interrupteur. Il se produit alors une véritable explosion de l'interrupteur et l'huile enflammée est projetée aux environs de celui-ci. Si elle rencontre une matière combustible, elle y met le feu et continue à brûler, cette matière lui servant de mèche.

Pour éviter de pareils accidents, il faut proportionner chaque interrupteur à la puissance totale de la centrale. Avec les grandes centrales modernes, on arrive à des interrupteurs réellement imposants. Pour réduire leurs dimensions, les constructeurs étudient soit des types d'interrupteurs cuirassés, à enveloppe en tôles d'acier très épaisses, soit des interrupteurs à huile comprimée qui exigent moins d'huile pour une même puissance.

Il sera toujours indispensable d'éviter la présence de toute substance combustible aux environs des interrupteurs. Les cellules du tableau devront donc être construites en béton ou en composés analogues ; les conducteurs devront être dénudés pour empêcher la propagation de l'incendie. L'isolement de caoutchouc sous couche extérieure d'amiante ne sera pas toléré, car l'amiante constitue une excellente mèche pour l'huile enflammée.

Les tableaux seront divisés en plusieurs sections, complètement séparées l'une de l'autre par des portes en fer. Les couloirs, dans le cas de tableaux construits dans un même plan, et les escaliers, pour les tableaux à plusieurs étages, seront extérieurs. Si un incendie se déclare dans

Digitized by Google

l'une des sections du tableau, cette section pourra être ainsi complètement isolée de ses voisines et le feu ne pourra étendre ses ravages. Il est toutefois utile que, normalement, les portes métalliques restent ouvertes, afin de permettre aux électriciens de se rendre compte de l'odeur produite par le cuivre ou l'huile échauffée, odeur qui, très souvent, les avertira du danger.

Lors d'incendies partiels ou totaux de centrales, on a toujours constaté la production rapide et l'envahissement de tous les locaux de la centrale par des fumées très abondantes et très denses, provenant de nombreuses matières résineuses en feu. Ces fumées entravent fortement les opérations de sauvetage; elles empêchent d'entrer dans les locaux incendiés, de se rendre compte des causes de l'incendie et d'effectuer les manœuvres nécessaires à l'arrêt des machines et à la mise hors tension des câbles et feeders.

Il faut donc munir chaque centrale d'appareils permettant de pénétrer dans les locaux emplis de gaz irrespirables. Les casques respiratoires, construits à cet effet, nécessitant de la part du personnel un long apprentissage et un laps de temps considérable pour en revêtir les sauveteurs, nous donnons notre préférence aux appareils à vent soufflé. Le casque des appareils à vent soufflé en usage dans les centrales doit être isolant; les tuyaux qui amènent l'air frais de l'extérieur peuvent être métalliques pour pénétrer dans les salles de machines, mais devront être en caoutchouc pour pénétrer dans le tableau et y couper la tension. On disposera donc, pour chaque centrale, d'un double jeu de tuyauteries s'adaptant à chaque appareil.

A côté de chaque machine et dans le tableau de distribution, les appareils extincteurs à main seront répartis en grand nombre. Il faudra éviter de se servir des appa-

Digitized by Google

reils à jet liquide si la tension existe encore aux bornes de la machine ou aux barres du tableau. On pourra, dans ce cas, employer avec succès des appareils extincteurs à poudre. La distribution des prises d'eau du service d'incendie doit être étudiée avec soin. Si l'on ne dispose pas d'une distribution commune d'eau sous pression, il sera nécessaire de construire un château d'eau et de prévoir, en outre, des pompes de secours mues par moteurs indépendants.

* * *

Terminons en signalant que si, malgré ces multiples précautions, un incendie détruisait la centrale en tout ou partie, le dernier moyen d'assurer le service de la clientèle devrait consister en la réunion du réseau à une ou plusieurs autres centrales de la région. Il est donc très utile de réunir plusieurs centrales au même réseau et d'éviter de tomber, sous prétexte de diminution des frais, dans une centralisation par trop grande de la production d'énergie électrique.

André Gerard.

Digitized by Google

CHRONIQUE.

351.821 La fixation des unités par voie législative.

Pour éviter toute confusion, j'appellerai *unité absolue* toute unité qui dérive immédiatement de l'unité ou des unités fondamentales ; *unités secondaires* les multiples ou sous-multiples décimaux d'une unité fondamentale, d'une unité absolue ou d'une unité accessoire (§ 7).

§ 1. — Longueurs.

Article premier. — L'unité fondamentale de longueur du système métrique décimal est le *Mètre*.

Le *Mètre* est défini par la distance, à la température de la glace pure fondante, des axes des deux traits tracés sur une large barre de platine iridié, sanctionnée comme étalon prototype international du Mètre par la première Conférence générale des Poids et Mesures réunie à Paris en 1889, et conservée au Bureau international des Poids et Mesures, à Sèvres.

La copie n° 8 du Mètre international est l'étalon légal de longueur pour la France ; elle est déposée aux Archives nationales.

§ 2. — Superficies.

Article 2. — L'unité absolue de superficie du système métrique est le *mètre carré*.

Toute superficie contenue dans le carré construit en

Digitized by Google

prenant, pour côté, l'unité fondamentale de longueur ou une unité secondaire de longueur constitue une unité de superficie. Le nom de chaque unité de superficie est celui de l'unité de longueur qui lui donne naissance suivi du mot « carré » ; *exemples :* mètre carré, décimètre carré, hectomètre carré, etc.

Dans la mesure des terrains, on appelle *centiare* le carré de 1 mètre au côté, *are* le carré de 10 mètres au côté, *hectare* le carré de 100 mètres au côté.

§ 3. — Volumes.

Article 3. — L'unité absolue de volume du système métrique est le *mètre cube.*

Tout volume contenu dans le cube construit en prenant pour arête l'unité fondamentale ou une unité secondaire de longueur constitue une unité de volume. Le nom de chaque unité de volume est celui de l'unité de longueur qui lui donne naissance suivi du mot « cube » ; *exemples :* mètre cube, décimètre cube, millimètre cube, etc.

Dans les mesures des bois de chauffage, on nomme *stère* le mètre cube. Les unités secondaires légales du stère sont le *décistère*, valant 1/10 de stère, et le *décastère* valant 10 stères.

§ 4. — Masses.

Article 4. — L'unité fondamentale de masse du système métrique décimal est le *Kilogramme.*

Le *Kilogramme* est défini par la masse du cylindre en platine iridié sanctionné comme étalon prototype international du kilogramme par la Conférence générale des Poids et Mesures mentionnée à l'article premier, et conservé au Bureau international des Poids et Mesures.

La copie n° 35 du Kilogramme international est l'étalon

Digitized by Google

légal de masse pour la France ; elle est déposée aux Archives Nationales.

Dans le commerce des diamants, perles fines et pierres précieuses, on est autorisé à désigner sous le nom de « *carat métrique* » la masse de 2 décigrammes. L'emploi du terme « carat » pour désigner toute autre masse demeure interdit.

§ 5. — Capacités.

Article 5. — L'unité de capacité du système métrique décimal pour les liquides, les matières sèches et les gaz est le *Litre*.

Le *Litre* est le volume de 1 kilogramme d'eau pure, privée d'air, mesuré sous la pression atmosphérique normale (art. 10), à la température de 4° C. (art. 11).

Dans les transactions publiques, on considérera ce volume comme égal au décimètre cube. De même, on assimilera le kilolitre, volume d'une tonne d'eau au mètre cube ; le millilitre, volume d'un gramme d'eau, au centimètre cube ; le microlitre au millimètre cube.

§ 6. — Densité. Masse volumique.

Article 6. — L'unité de densité du système métrique est représentée par la plus grande densité de l'eau, sous la pression atmosphérique normale (art. 10). Pratiquement, on considérera la densité de l'eau pure à 4° C. (art. 11) comme représentant l'unité de densité.

La *masse volumique* d'un corps est la masse, exprimée en kilogrammes, de 1 décimètre cube de ce corps.

Dans les transactions publiques, on regardera la densité et la masse volumique comme identiques.

Digitized by Google

§ 7. — Force.

Article 7. — L'unité absolue de force du système métrique décimal est le *Cop*.

Le *Cop* (abréviation de Copernic) est la force qui, agissant sur une masse de 1 kilogramme, lui communique une accélération de vitesse de 1 mètre à la seconde par seconde. [La seconde est une unité fondamentale de temps, dont la valeur est la 1/86,400e partie du jour solaire moyen, unité astronomique invariable, dont l'étalon est donné par la rotation et la translation de la Terre.]

Dans les transactions publiques, on pourra, par dérogation autorisée au système absolu métrique, employer comme unité accessoire de force l'*hectogramme* (*force*), dénommé aussi *hectogramme* (*poids*), c'est-à-dire le poids normal de la masse de 1 hectogramme.

1 hectogramme (force) vaut sensiblement 1 cop (exactement $0^c,980665$). Réciproquement, 1 cop est égal au poids normal de 1,01972 hectogramme (masse).

Les unités secondaires de l'hectogramme (force) ou hectogramme (poids) sont dénommées en partant du nom des unités de masse qui leur donnent naissance ; *exemples :* gramme (force) ou gramme (poids), kilogramme (force) ou kilogramme (poids), tonne (force) ou tonne (poids), etc.

1 kilogramme (poids) vaut 9,80665 cops.

Remarque. — Le poids normal de la masse de 1 hectogramme est l'effort statique exercé par la masse de 1 hectogramme soumise à l'action de la pesanteur normale. La *pesanteur normale* est celle qui communiquerait à un corps tombant librement une accélération de vitesse de 9,80665 mètres à la seconde par seconde $\left(\text{ou } 9{,}80665 \frac{\text{m}}{\text{sec}^2}\right)$.

La valeur $9{,}80665 \frac{\text{m}}{\text{sec}^2}$ a été déduite, par réduction au

Digitized by Google

niveau de la mer et à la latitude de 45°, de la valeur de la pesanteur déterminée au Bureau international des Poids et Mesures. On l'appelle *g normal.*

§ 8. — Travail ou énergie.

Article 8. — L'unité absolue de travail ou d'énergie du système métrique est le *Joule.*

Le *Joule* est le travail qu'une force de 1 cop produit quand son point d'application se déplace de 1 mètre dans sa propre direction.

Dans les transactions publiques, on pourra, par dérogation autorisée au système absolu métrique, employer comme unité accessoire de travail l'hectogramme (force)-mètre, qu'on appellera, par abréviation, *hectogrammètre.*

1 hectogrammètre vaut sensiblement 1 joule (exactement $0^{j},980665$).

Les unités secondaires de l'hectogrammètre seront dénommées de la même manière abrégée en partant du nom des unités accessoires de force qui leur donnent naissance ; *exemples :* grammètre, kilogrammètre, tonnemètre, etc.

1 kilogrammètre vaut 9,80665 joules.

Le joule étant aussi représenté par le travail qu'une puissance de 1 watt (art. 9) produit en 1 seconde, on peut appeler le joule du nom de *watt-seconde.*

Dans les applications de l'Electricité, on est autorisé à se servir comme unité pratique de travail ou d'énergie du *watt-heure* valant 3.600 watts-seconde, et de ses multiples décimaux, l'*hectowatt-heure*, valant 100 watts-heure, le *kilowatt-heure* valant 1.000 watts-heure.

Remarque. — Le joule est également représenté par l'énergie dépensée en 1 seconde par un courant électrique invariable d'une intensité de 1 ampère (art. 16) au travers d'une résistance électrique de 1 ohm (art. 14).

Digitized by Google

§ 9. — Puissance.

Article 9. — L'unité absolue de puissance du système métrique est le *Watt*.

Le *Watt* est la puissance engendrée par le déplacement d'une force de 1 cop à la vitesse de 1 mètre par seconde.

Le watt est aussi représenté par le quotient $\frac{1 \text{ joule}}{1 \text{ seconde}}$.

Dans les transactions publiques, on pourra, par dérogation autorisée au système absolu métrique, employer comme unité accessoire de puissance le poncelet normal, qu'on appellera, par abréviation, *poncelet*.

1 poncelet est la puissance qui produit un travail de 100 kilogrammètres (art. 8) par seconde.

1 poncelet vaut approximativement 1 kilowatt (exactement $0^{kw},980665$).

Remarque I. — Le poncelet vaut les 4/3 de l'ancienne unité dénommée « cheval-vapeur normal », ou, par abréviation, « cheval-vapeur », d'une puissance de 75 kilogrammètres dans les conditions de la pesanteur normale (art. 7, remarque).

Remarque II. — L'application aux extrémités d'un conducteur de 1 ohm de résistance (art. 14) d'une force électromotrice de 1 volt (art. 15) engendre un courant d'une intensité de 1 ampère (art. 16), et provoque la dissipation continue de la puissance de 1 watt.

Note. — La définition de la « puissance apparente », qu'on rencontre dans les Applications de l'Electricité, fait l'objet de l'art. 18.

§ 10. — Pression.

Article 10. — L'unité absolue de pression du système métrique est la *Décabarye* [1].

(*Voir note page 172*)

Digitized by Google

La décabarye est la pression exercée par une force de 1 cop, uniformément répartie sur une surface de 1 mètre carré.

Le sous-multiple 1/10 de cette unité absolue est dénommé *Barye* (2).

La barye est représentée par la pression exercée par une colonne de mercure de $750^{mm},05$ de hauteur, à 0° C. (art. 11), dans les conditions de la pesanteur normale (art. 7, remarque).

Dans les applications industrielles, on pourra employer comme unité accessoire le kilogramme (poids) par centimètre carré, qu'on désigne sous le nom d'*atmosphère industrielle*, ou toute autre unité secondaire de l'hectogramme (force) associée à une unité métrique de superficie; *exemple :* le kilogramme (force) par millimètre carré [dans les calculs de résistance des pièces métalliques].

L'atmosphère industrielle est représentée par la pression d'une colonne de mercure de $735^{mm},5$ de hauteur, à 0° C., dans les conditions de la pesanteur normale.

1 atmosphère industrielle vaut 98066,5 décabaryes.

La pression atmosphérique normale est représentée par la pression d'une colonne de mercure de 760^{mm} de hauteur à 0° C., dans les conditions de la pesanteur normale. Elle vaut 101321,1 décabarye ou environ 1 mégabarye (1 million de baryes).

§ II. — Température.

Article 11. — L'unité de température du système métrique est le *Degré centigrade*.

(1) Si l'on veut donner un nom de savant à cette unité, celui de Torricelli (par abréviation *tor*) pourrait être pris en considération ; plusieurs physiciens l'ont proposé.

(2) De même que le sous-multiple 1/1.000 du kilogramme est dénommé gramme dans le décret du 28 juillet 1903. Le nom de *barye* a été adopté, sur la proposition de M. Guillaume, par le Congrès international des Electriciens de 1889.

Digitized by Google

Le *Degré centigrade* est le degré de l'*échelle normale*, c'est-à-dire le degré de l'échelle centésimale du thermomètre à hydrogène à volume constant.

Les points fondamentaux de l'échelle normale sont 0° C., c'est-à-dire l'état du thermomètre dans la glace pure fondante, et 100° C., c'est-à-dire l'état du thermomètre dans la vapeur saturante et privée d'air de l'eau pure bouillante, tous deux sous la pression atmosphérique normale (art. 10).

Note. — Dans le thermomètre à hydrogène à volume constant, la pression initiale de l'hydrogène à la température de la glace pure fondante est égale à celle d'une colonne de mercure de 1 mètre de hauteur (environ 1,33 mégabarye).

§ 12. — Quantité de chaleur.

Article 12. — L'unité de quantité de chaleur du système métrique est la *Calorie*.

La *Calorie* est la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de la masse de 1 kilogramme d'eau de 1 degré C. Plus exactement, la « Calorie$_{150}$ » est la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de la masse de 1 kilogramme d'eau de 14°5 C. à 15°5 C)

Dans les transactions publiques, on pourra employer le sous-multiple 1/1,000 de cette unité, qu'on appellera « petite calorie » : c'est la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de la masse de 1 gramme d'eau de 1 degré C. (Plus exactement, la « petite calorie$_{15°}$ » est la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température de la masse de 1 gramme d'eau de 14°5 C à 15°5 C.).

1 Calorie est une énergie qui correspond à environ 426,6 kilogrammètres, ou 4,184 joules ou 1,166 watt-heure.

Digitized by Google

§ 13. — Intensité lumineuse ou quantité de lumière.

Article 13. — L'unité d'intensité lumineuse ou de quantité de lumière est la *Bougie*.

La *Bougie* est l'intensité lumineuse égale au 1/20e de l' « unité Violle ».

L'unité Violle est la quantité de lumière émise en direction normale par 1 centimètre carré de platine fondu, à la température de sa solidification.

La bougie peut être représentée par une intensité lumineuse égale aux 100/90 de l'étalon Hefner normal, à acétate d'amyle à mèche libre.

§ 14. — Résistance électrique.

Article 14. — L'unité de résistance électrique est l'*Ohm*.

L'*Ohm* est représenté par la résistance électrique offerte à un courant électrique invariable par une colonne de mercure à 0° C., ayant une masse de $14^{g},4521$, une section constante et une longueur de $1^{m},06300$.

§ 15. — Différence de potentiel électrique. Force électromotrice.

Article 15. — L'unité de différence de potentiel électromotrice est le *Volt*.

Le *Volt* (abréviation de Volta) est représenté par une force électromotrice égale au 1/1,0184 de la force électromotrice de l'étalon Weston normal, au sulfate de cadmium, à 20° C., sous la pression atmosphérique normale, dont un prototype légal est conservé au..... (*à compléter par le législateur*).

Digitized by Google

§ 16. — Intensité de courant électrique.

Article 16. — L'unité d'intensité de courant électrique est l'*Ampère*.

L'*Ampère* est l'intensité du courant produit lorsqu'une force électromotrice de 1 volt est appliquée d'une façon constante aux extrémités d'un conducteur de 1 ohm de résistance.

§ 17. — Quantité d'électricité. Courant électrique.

Article 17. — L'unité de quantité d'électricité ou de courant électrique est le *Coulomb*.

Le *Coulomb* est la quantité d'électricité ou le courant électrique débité par seconde par une intensité de courant invariable de 1 ampère.

Le coulomb (ou *ampère-seconde*) peut être représenté par le courant d'intensité invariable qui, en traversant une solution aqueuse d'azotate d'argent suivant la spécification annexée à la présente loi, provoque un dépôt d'argent à raison de $0^g,0111800$ par seconde.

Dans les transactions publiques, on peut évaluer la consommation d'énergie électrique des distributions à courant continu sous potentiel constant en *ampères-heure* valant 3,600 ampères-seconde. [1 ampère provoque le dépôt de $4^g,025$ d'argent par heure.]

§ 18. — Puissance électrique vraie. Puissance électrique apparente.

Article 18. — L'unité de puissance électrique vraie est le *Watt* (art. 9).

L'unité de puissance électrique apparente est le *Volt-ampère*.

Digitized by Google

Le *Volt-ampère* est la puissance électrique apparente représentée par le produit de la puissance vraie de 1 watt multipliée par un « facteur de puissance », inférieur à l'unité qu'on appelle cos φ.

1 volt-ampère = 1 watt × cos φ.
1 kilovolt-ampère = 1 kilowatt × cos φ.

Note. — Le facteur de puissance est le cosinus du décalage de la phase de l'intensité du courant par rapport à la phase de la force électromotrice.

Le *kilovolt-ampère* est l'unité secondaire usuelle dans les transactions concernant les machines génératrices à courant alternatif monophasé ou polyphasé.

§ 19. — Monnaies.

Article 19. — L'unité monétaire du système métrique décimal est la *pièce de 5 francs* en argent.

La pièce de *5 francs* est la masse d'argent au titre de 900/1,000 d'argent fin pour 100/1,000 d'alliage [1] dont la masse est de 25 grammes.

Le dixième du franc est dénommé *décime*.

Le centième du franc est dénommé *centime*.

(Extrait de la Revue générale des Sciences, 15 janvier 1913).

R. de Baillehache.

(1) Le titre de 900/1,000 a été établi par la loi de l'an XI. Une loi du 25 mai 1864 et une autre du 27 juin 1866 ont ordonné que les autres pièces d'argent seraient dorénavant au titre de 835/1,000. C'est pourquoi je ne définis pas le *franc*.

Digitized by Google

SÉANCE DU 8 MAI 1913

M. H. Chauvin, *président*, au fauteuil.

Ont signé la liste de présence : MM. Barmack, Chauvin, De Bast, André Gerard, Eric Gerard, Gunsbourg, Janne, Kerbaker, Kouvaitseff, Küntziger, Roselier, Verlinden.

M. H. Chauvin dépose sur le bureau les ouvrages suivants, offerts à l'Association :

Les sécurités électriques appliquées aux installations de signalisation à manœuvre manuelle, par G. Yseboodt, ingénieur des chemins de fer de l'Etat Belge.

J. Goemaere, Bruxelles, H. Dunod et E. Pinat, Paris, F.-A. Brockhaus, Leipzig, 1913.

Passage de l'électricité à travers les gaz, par J.-J. Thomson, traduit d'après la 2e édition anglaise, par R. Fric et A. Faure.

Gauthier-Villars, Paris, 1912.

La Télégraphie sans fil, la télémécanique et la téléphonie sans fil à la portée de tout le monde, par E. Monier.

7e édition; H. Dunod et E. Pinat, Paris, 1913.

La parole est donnée au camarade **E.-A. Kerbaker,** pour sa communication.

Digitized by Google

621.332

Électrification des Chemins de fer du Midi. Construction des lignes aériennes.

La Compagnie des Chemins de fer du Midi, ayant dans son réseau des Pyrénées des profils très durs pour la traction à la vapeur et pouvant utiliser des chutes importantes, décida, il y a quelque temps, l'électrification d'une partie de son réseau.

Cette Compagnie procéda d'abord à des essais méthodiques sur le matériel roulant et sur les lignes aériennes de différents constructeurs, ensuite elle fit son choix et confia à quelques constructeurs l'exécution de commandes importantes. Tout a marché rapidement et nous verrons, cet été, un des tronçons des lignes pyrénéennes exploité à l'électricité.

Une description générale de cette importante installation a été faite le 17 avril dernier, devant la Société Internationale des Electriciens, par M. Jullian, ingénieur en chef du matériel et de la traction à la Compagnie des chemins de fer du Midi. M. Jullian est aussi l'auteur d'une description des différents types de lignes étudiées à titre d'essai dans les Pyrénées Orientales. Cette description a paru, il y a deux ans environ, dans la *Revue Générale des Chemins de Fer et Tramways*.

J'ai eu l'honneur de diriger, d'abord la construction d'une des lignes d'essai dans les Pyrénées Orientales, ensuite celle des lignes que la Compagnie des chemins de fer du Midi décida d'électrifier, il y a un peu plus d'un an. Je suis donc en mesure de vous donner à ce sujet quelques renseignements précis d'ordre technique et descriptif.

Digitized by Google

Dans un récent discours qu'un ingénieur américain bien connu, M N.-W. Storer, a fait dans son pays, il a dit, au sujet des lignes pour traction électrique : « Il y a lieu maintenant de considérer avec attention la question des constructions aériennes pour traction électrique. Les différents types de lignes établis jusqu'à présent devraient enfin suffire pour permettre de *standariser* ces constructions, chose qui jusqu'à présent n'a pas encore été faite. »

En Europe, aussi bien qu'en Amérique, une « standarisation » n'existe pas encore ; elle serait pourtant très utile à l'extension des électrifications, car elle permettrait l'établissement de pièces bien définies, à des prix plus bas et avec des délais plus rapides, comme il en est à présent pour les fournitures des tramways urbains.

Cette standarisation servirait aussi à réduire les différends qui existent bien souvent entre les constructeurs ou compagnies exploitantes et les services du contrôle. Dans tous les pays, en effet, aucune installation ne peut être mise en exploitation sans l'avis favorable des autorités compétentes : ces autorités sont obligées de se baser sur des règlements bien souvent trop anciens par rapport aux progrès des industries. Quand ces autorités ne croient pas devoir envisager certaines questions d'un point de vue élevé et général, qui risquerait de les faire sortir de l'application stricte et rigoureuse des règlements, l'ouverture d'une nouvelle exploitation, par exemple d'une ligne électrifiée de chemin de fer, peut être retardée et de nouveaux frais de construction engagés.

Une installation ayant un caractère de nouveauté absolue échappe, à son commencement, au contrôle des autorités ; mais à mesure qu'elle se répète et se perfectionne, le contrôle se fait et devient de plus en plus précis et rigoureux. C'est ce qui est arrivé, par exemple, pour les lignes de traction électrique à haute tension pour lesquelles, actuellement, on demande dans certains pays

Digitized by Google

un coefficient de sécurité égal à 5 dans les cas les plus défavorables, même dans le cas d'un vent de 120 kilogs, vent qui est connu sous le nom de « vent administratif. »

Une standarisation des lignes à haute tension pour la grande traction pourrait aider à diminuer ces difficultés. Il est donc à souhaiter que les ingénieurs qui se spécialisent dans ce genre de travaux plantent à présent les premiers jalons dans cette voie et que lors du prochain Congrès international d'ingénieurs électriciens, qui se tiendra en Amérique, on puisse formuler des règles précises et les faire adopter.

Difficultés de construction et influence des organes de prise de courant.

Dans l'électrification d'une ligne de chemin de fer, la question de la construction aérienne est des plus importantes, car il s'agit d'assurer à tous les points d'une construction qui se prolonge sur des kilomètres et des kilomètres une solidité mécanique et électrique dont dépendent la sécurité et la régularité de l'exploitation.

A cette condition d'ordre technique s'en ajoute une autre, non moins importante, qui est d'ordre économique. Pour permettre l'extension des électrifications, il faut constamment réduire le prix des lignes, bien qu'on tende toujours à augmenter le voltage et la vitesse. C'est surtout l'accroissement de vitesse qui rend la question particulièrement difficile.

Ces problèmes ne peuvent pas être séparés de ceux qui concernent les organes de prise de courant : un archet fonctionnant bien sous un type de ligne ne se comporterait pas de la même façon sous un autre. On doit admettre comme un axiome que pour chaque type de ligne il faut avoir un type de prise de courant déterminé.

Quoique actuellement on essaye, en Amérique, d'uti-

Digitized by Google

liser le trolley pour les lignes à suspension longitudinale (dites aussi lignes caténaires) ce mode de capter le courant ne semble pas suffisamment perfectionné pour s'adapter à la grande traction à haute tension pour laquelle le type à archet a donné jusqu'à présent les meilleurs résultats.

C'est le type dit « pantographe » qui est employé sur les chemins de fer du Midi, type américain classique, un peu modifié en ce qui concerne le frotteur. En effet,

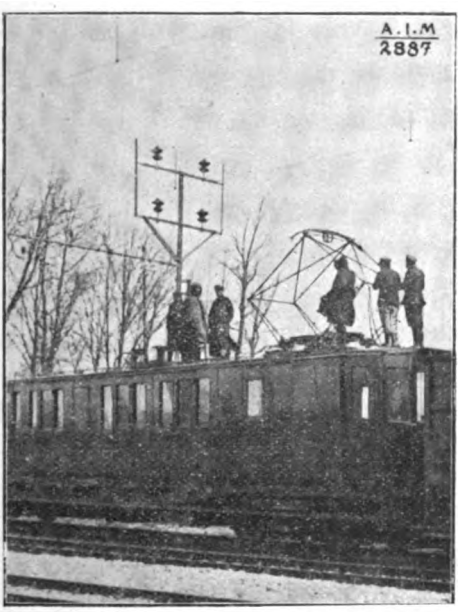


Fig. 1.

cette Compagnie a trouvé dans ses essais que la partie droite du frotteur, raccordée à ses extrémités à deux cornes à rayon assez faible, se prêtait mal au passage des aiguillages. Actuellement tout le frotteur est bombé et sa largeur a été portée à 2 mètres, tandis qu'auparavant elle n'était que de $1^{m}60$ (fig. 1).

Digitized by Google

Comme on commence à le faire un peu partout, on a adopté deux prises de courant par automotrice ou locomotive. Une prise de courant double offre certainement des avantages : celui de réduire l'arc de rupture lorsque l'une des prises de courant quitte la ligne, à cause des irrégularités de cette dernière, est réellement appréciable. Mais il ne faut pas céler que, pendant la marche, les deux prises de courant se troublent mutuellement parce que les vibrations de l'une se transmettent à la ligne et de la ligne à l'autre. Cet inconvénient s'accroît dans de fortes proportions lorsqu'on emploie le contrôle multiple, c'est-à-dire plusieurs prises de courant sous la ligne.

Différents systèmes de lignes a suspension longitudinale.

C'est depuis une douzaine d'années qu'on a pensé à la suspension longitudinale du fil de contact, grâce à laquelle, sans être obligés d'employer un nombre exorbitant de poteaux, on lui évite des dénivellations trop grandes et on assure ainsi aux prises de courant un fonctionnement plus régulier.

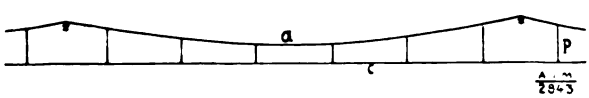


Fig. 2.

En Amérique on a déjà employé sur une vaste échelle cette construction qu'on appelle *caténaire*, et surtout le système caténaire simple, c'est-à-dire constitué par un câble porteur *a* auquel est suspendu, moyennant des organes de suspension *p* (appelés par les constructeurs *pendules*) le fil de contact *c* (voir fig. 2).

La Compagnie des Chemins de fer du Midi emploie pour

Digitized by Google

ses lignes le système caténaire simple, lequel, à part la question du poids et la question esthétique — car il est plus léger et plus élégant — n'est pas autre chose que le système employé aux Etats-Unis.

Avant de décider son emploi, cette Compagnie avait essayé dans les Pyrénées Orientales plusieurs autres systèmes, parmi lesquels un système rigide et cinq systèmes compensés.

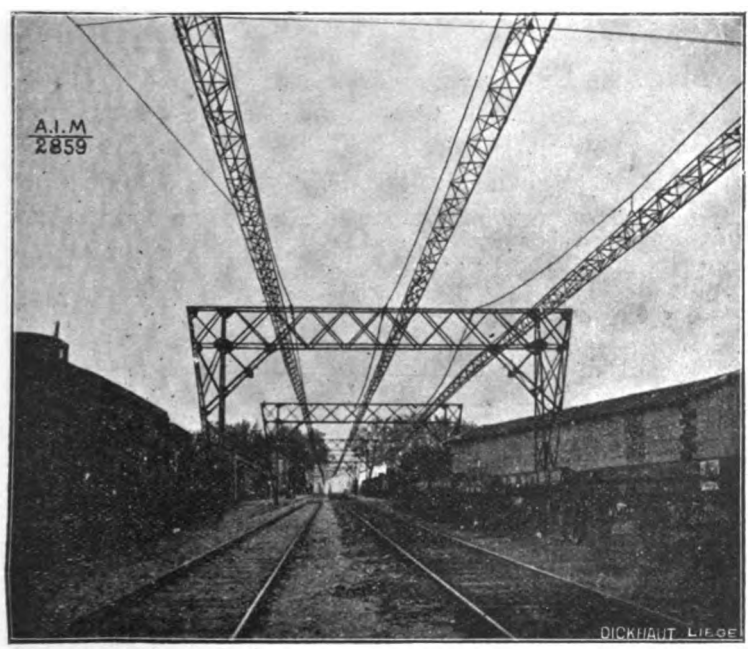


Fig. 3.

La fig. 3 donne un aperçu du système rigide employé : c'est une poutre triangulaire en treillis très léger suspendue à un gros câble en acier, soutenu par des poteaux tous les 50 mètres. Un feeder en aluminium, placé à l'intérieur

Digitized by Google

du treillis, limite la chute de voltage. Les essais de ce système ont montré que les organes de prise de courant utilisés pour les lignes ordinaires ne donnent pas un résultat satisfaisant avec ce système rigide, pour lequel il est nécessaire d'adopter un archet tout différent.

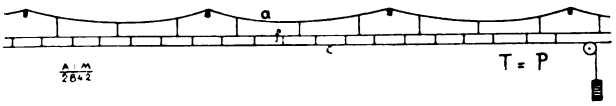


Fig. 4.

Parmi les systèmes compensés, il y en avait où la tension constante n'était assurée qu'au fil de contact, par exemple suivant la disposition de la fig. 4. Au câble porteur *a* est suspendu un fil auxiliaire *f* auquel est attaché, à son tour, moyennant des griffes pouvant courir sur lui, le fil de contact *c* qui est tendu par un contre-poids P.

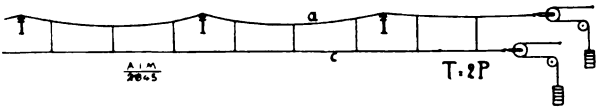


Fig. 5.

Une autre disposition est celle figurée à la fig. 5 : le câble porteur et le fil de contact sont tendus chacun par un contre-poids ; le câble porteur peut se déplacer dans un sens ou dans l'autre grâce à ses supports spéciaux qui sont très hauts et oscillent autour de leur base : le fil de contact est ainsi porté, par le câble porteur, à droite ou à gauche ; s'il est de métal différent, ayant un coefficient de dilatation différent, comme c'est le cas de la ligne des chemins de fer du Midi, il se déplace un peu par rapport au câble porteur, ce petit déplacement étant permis par la longueur des pendules qui peuvent prendre une position oblique (fig. 5).

Digitized by Google

Pour les deux cas mentionnés, la valeur P du contre-poids peut être égale à la tension T de la ligne, ou en être un sous-multiple, suivant les dispositions adoptées pour les poulies de renvoi.

Dans la disposition fig. 4, le câble porteur a des flèches variables suivant la température ; par conséquent le fil de contact n'est horizontal qu'à une température déterminée.

Dans le système fig. 5, le câble porteur, qui est soumis à une tension constante, a des flèches invariables ; par conséquent le fil de contact garde son horizontalité à n'importe quelle température.

Pratiquement, aucun de ces deux systèmes — et, en général, aucun système compensé — n'a donné le résultat auquel on s'attendait.

Avec n'importe quel système, il y a tellement de frottements sur les différents points d'appuis, que la tension des lignes n'est jamais égale à celle qu'elle devrait être. Plus le rapport T/P est grand, plus les postes de contre-poids sont éloignés ; plus la ligne a de courbes, moins ces systèmes fonctionnent bien.

Il m'est arrivé de soulever d'environ 20 centimètres quelques-uns de ces contre-poids et de ne pas les voir redescendre.

Ayant construit deux tronçons de 500 mètres chacun, les deux avec le système fig. 5 mentionné, l'un dans un rayon de 700 mètres avec le rapport T/P égal à 2, et l'autre dans un rayon de 500 mètres avec le rapport précité égal à 4, j'ai obtenu le meilleur résultat pour le premier tronçon, bien que les poteaux fussent placés à l'intérieur de la courbe, ce qui est plus défavorable [1].

(1) Il est intéressant de noter que l'emploi des contre-poids sur la ligne avec fil auxiliaire, représentée fig. 4, a produit tellement de déboires qu'on a dû carrément les supprimer. Après cette suppression, la ligne a donné de très bons résultats.

Digitized by Google

Si l'on considère qu'une ligne compensée coûte de 1,500 à 2,000 francs de plus par kilomètre de voie, que les complications sont bien plus grandes et, par conséquent, plus probables les dérangements ; que le résultat, au point de vue du fonctionnement des archets, n'est pas meilleur que pour une ligne caténaire simple, on s'explique pourquoi la Compagnie des chemins de fer du Midi a adopté le système le plus simple et qu'on peut construire le plus rapidement.

Calcul des lignes caténaires et bases techniques pour leur « standarisation. »

Dans une ligne caténaire simple le fil de contact suit les variations de flèche du câble porteur. Comme on le sait, ces variations sont fonction de la température.

Pour analyser ces variations et étudier leur influence sur la marche des organes de prise de courant, nous appliquerons au câble porteur d'une ligne caténaire la même formule qu'on emploie pour les fils simples, c'est-à-dire

$$\theta = \frac{a^2 P^2}{24 \alpha} \left(\frac{1}{T^2_1} - \frac{1}{T^2} \right) + \frac{T - T_1}{\alpha s E} \qquad (1)$$

où

a	désigne la longueur de la portée en mètres ;
P	le poids en kgs d'un mètre de ligne caténaire ;
T_1 et T	les tensions en kgs du câble porteur à $\tau_1{}^\circ$ et τ° C ;
θ	la différence $\tau - \tau_1$;
s	la section mm² du câble porteur ;
α	le coefficient de dilatation du câble porteur ;
E	le module d'élasticité du câble porteur.

L'équation (1) montre immédiatement le grand avantage résultant de l'emploi du système caténaire plutôt que le système à simple fil. Considérons, en effet, une

Digitized by Google

portée de 25 mètres, un fil de contact en cuivre de 50 mm², un coefficient de sécurité imposé de 3 et un écart de température de 58° C.

Avec une construction en fil simple, à la température minima, la flèche est :

$$F = \frac{25^2 \times 0{,}45}{8 \times 650} = 0^m054.$$

A l'aide de l'équation (1) on trouve qu'à la température maxima la tension du fil de contact atteint de 150 kgs et sa flèche :

$$F' = \frac{25^2 \times 0{,}45}{8 \times 150} = 0^m235.$$

Avec une construction caténaire, on trouve respectivement les valeurs suivantes :

$$f = \frac{25^2 \times 0{,}88}{8 \times 1320} = 0^m052 \qquad f' = \frac{25^2 \times 0{,}88}{8 \times 640} = 0^m107.$$

La différence entre les deux flèches au câble porteur est donc de 107 — 52 = 55 mm. En réalité, le fil de contact, qui suit les variations de ces flèches parce que suspendu invariablement au câble porteur, ne présente aux archets que des flèches moitié moindre, c'est-à-dire des flèches maxima de 55/2 = 27 mm parce qu'il est monté horizontal à la température moyenne.

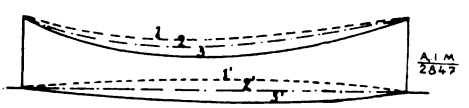


Fig. 6.

Le croquis de la figure 6 montre en traits pleins la flèche positive maxima du fil de contact ; en pointillés, sa flèche négative maxima, et en traits mixtes la disposition des fils à la température moyenne.

Digitized by Google

On voit donc qu'avec une construction caténaire on a, sur une longueur de $12^{m}50$ (pour nous référer à l'exemple choisi), une dénivellation maximum du fil de contact de 27 mm ; tandis que, pour une construction en simple fil, cette dénivellation atteint 235 mm, c'est-à-dire environ neuf fois plus.

Si nous considérons une automotrice marchant à 60 kilomètres à l'heure, chacun de ses archets doit se baisser et se relever quarante fois à la minute : il est facile de s'imaginer quelle énorme différence il doit y avoir pour une prise de courant quand l'amplitude de ses oscillations varie de 27 à 235 mm.

Sans même recourir à des exemples numériques, on pouvait prévoir les résultats précités par les trois considérations suivantes :

1°) Le fil inférieur d'une construction caténaire, étant monté horizontal à une température moyenne, a une flèche maxima positive ou négative moitié de celle du câble porteur.

2°) Le câble porteur, étant généralement en acier, peut être tendu bien davantage — trois à quatre fois plus que le cuivre, pour une même section — il s'ensuit que, pour une même portée, ses flèches sont de trois à quatre fois moindres que celles d'un fil de cuivre.

3°) Le câble porteur, étant généralement en acier, a un coefficient de dilatation inférieur à celui du cuivre : donc il est moins sensible aux différences de température.

Dans l'équation (1), P indique le poids d'un mètre de ligne caténaire, qui peut se décomposer ainsi :

$$P = P_1 + P_2,$$

P_1 étant le poids propre du câble porteur,

P_2 étant le poids du restant de la construction, c'est-à-dire du fil de contact et des pendules.

Digitized by Google

Lorsque l'équation (1) se réfère à un simple fil, la quantité P est une constante et l'équation du 3e degré se résout facilement.

Pour les lignes caténaires, cette quantité P n'est pas constante en général, même pour un type de ligne bien déterminé. Pour fixer les idées, ne considérons que les lignes caténaires simples, avec fil de contact en cuivre. Les différences qu'il peut y avoir entre elles dépendent des conditions suivantes :

1°) Le cuivre peut avoir une section différente, suivant les conditions de courant et chute de tension admises.

2°) La construction de la ligne, en ce qui concerne le poids de câble et des pendules, peut varier notablement suivant le constructeur.

3°) Pour un même type de ligne, le poids P_2 peut varier d'une portée à l'autre, suivant leur longueur. Cette variation de poids, qui à première vue peut paraître anormale, s'explique facilement, quand on songe que pour n'importe quelle longueur de portée on a l'habitude, justifiée du reste, d'assurer une distance constante entre la voie et le fil de contact, entre ce dernier et les différents points A (voir fig. 7) qui supportent le câble porteur ; également une distance à peu près constante entre pendules et une tension constante au câble porteur pour n'importe quelle portée (cette tension étant donc variable seulement avec la température).

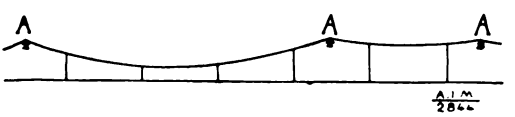


Fig. 7.

Il s'en suit, comme il est montré dans la figure 7, que dans une portée plus courte les pendules sont plus longs et par conséquent P_2 est plus élevé. Cette différence sur

Digitized by Google

la valeur de P_2 peut atteindre de 3 à 4 % pour une ligne de type déterminé.

Pour calculer une ligne caténaire d'un type donné et dresser le tableau des tensions et des flèches, on devrait donc résoudre l'équation (1) en donnant à chaque portée la valeur de P qui lui convient. En pratique, si on prend pour P_2 une valeur moyenne, on a encore des résultats sur lesquels on peut se baser pour une bonne construction. Une fois le tableau dressé, il ne reste qu'à calculer la longueur des différents pendules, chose très simple, car, comme on le sait, on assimile la courbe du câble porteur à une parabole : $y^2 = 2\,p\,x$.

En examinant les différentes lignes caténaires construites en Europe, on voit qu'en beaucoup de cas le câble porteur est composé de sept fils en acier galvanisé chacun de 25 à 27/10 de diamètre et celà qu'il s'agisse de fil de contact en cuivre de 50 mm² ou de 100 mm². Ce câble ayant donné, dans les cas les plus différents, un bon résultat, on pourrait s'accorder pour lui donner une section et une qualité déterminées. On pourrait ainsi considérer sa section s comme une quantité invariable et introduire un coefficient qui servirait de base aux comparaisons :

$$k = \frac{P_1 + P_2}{s}.$$

L'équation (1) devient alors :

$$\theta = \frac{a^2\,k^2}{24\,\alpha}\left(\frac{1}{t^2_1} - \frac{1}{t^2}\right) + \frac{(t - t_1)}{\alpha\,E}$$

où t et t_1 sont les tensions du câble porteur, par mm².

Le coefficient k représente, s'il est permis de s'exprimer ainsi, la *densité* de la ligne caténaire. Ce coefficient, pour un fil de cuivre donné, est plus ou moins grand suivant que la construction est plus ou moins lourde. Chaque

Digitized by Google

ligne caténaire pourra avoir son numéro et l'on pourra ainsi entrer dans la voie de la « standarisation. »

Description des lignes de la Compagnie des chemins de fer du Midi construites récemment.

La Compagnie des chemins de fer du Midi a choisi, pour l'électrification de ses lignes, le courant monophasé à 16 périodes 2/3, 12,000 volts.

Pour la presque totalité de ces lignes, le courant est transporté des centrales aux sous-stations à 60,000 volts : ce sont les sous-stations qui alimentent les lignes à 12,000 volts.

Les lignes actuellement achevées sont les suivantes :

Lourdes-Pierrefitte, à voie simple, longueur 21 kilomètres ; Ille-Perpignan, à voie simple, longueur 22 kilomètres ; Tarbes-Lourdes, à double voie, longueur 21 kilomètres.

Celles en construction sont :

Lourdes-Pau, à double voie, longueur 39 kilomètres ; Tarbes-Montréjeau, à double-voie, longueur 52 kilom.

La construction de la ligne Lourdes-Pierrefitte a commencé au mois d'avril 1912 ; celle de Tarbes-Lourdes au mois d'octobre 1912 et celle de Ille-Perpignan au mois de novembre 1912.

Poteaux.

Pour les lignes Lourdes-Pierrefitte et Lourdes-Tarbes, ainsi que pour l'équipement des différentes gares, le poteau adopté est le poteau type « Midi ». Ce poteau, étudié par la Compagnie des chemins de fer du Midi, est constitué par de vieux rails, vieilles éclisses et vieux boulons d'éclisses hors d'usage. Les rails sont à double champignon (longueur $5^{m}50$) et pèsent 37,5 kilogs le mètre.

Sur la ligne Lourdes-Pierrefitte, le poteau qui sert à la

Digitized by Google

ligne de traction sert en même temps au transport de force à 60,000 volts qui se fait de la centrale de Soulom, à 1 kilomètre de Pierrefitte, jusqu'à la sous-station, en gare de Lourdes. Ce transport est réalisé au moyen de quatre câbles en aluminium de 131 mm² chacun.

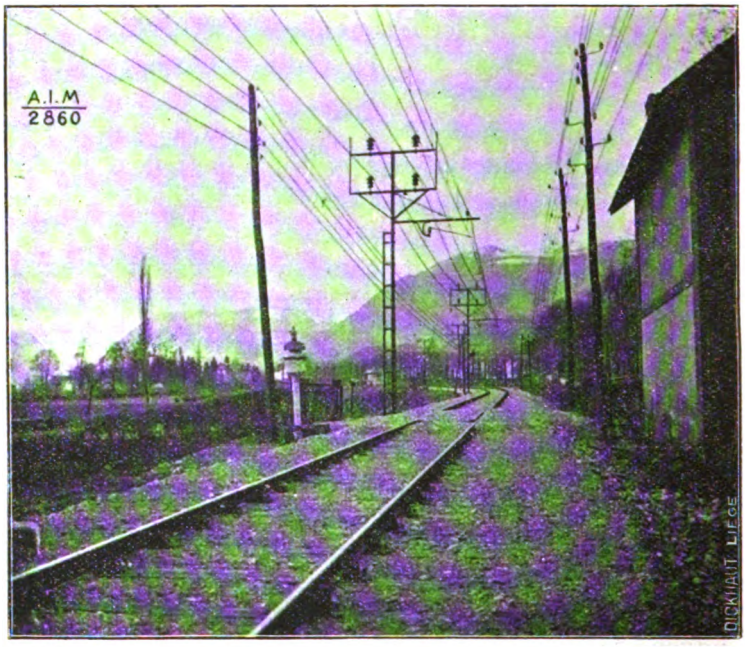


Fig. 8.

La fig. 8 montre le poteau normal en vieux rails. Ce même poteau est utilisé là où la ligne de transmission, à cause d'exigences locales, quitte la ligne de chemin de fer. Pour la seule ligne de traction, le poteau est analogue, mais plus court. Sur cette ligne de Pierrefitte, la distance entre poteaux, pour la ligne de traction, est de 50 mètres au maximum ; pour la ligne de transmission, quand elle

Digitized by Google

est seule, de 70 mètres environ. Les rayons des courbes descendent jusqu'à 313 mètres.

Pour la ligne à double voie de Lourdes à Tarbes, le rayon des courbes ne descend pas au-dessous de 500 mètres. Les portées adoptées sont de 60 mètres. Le même poteau en vieux rails a été adopté, mais généralement renforcé. Il n'a pu être employé tel quel sur la ligne

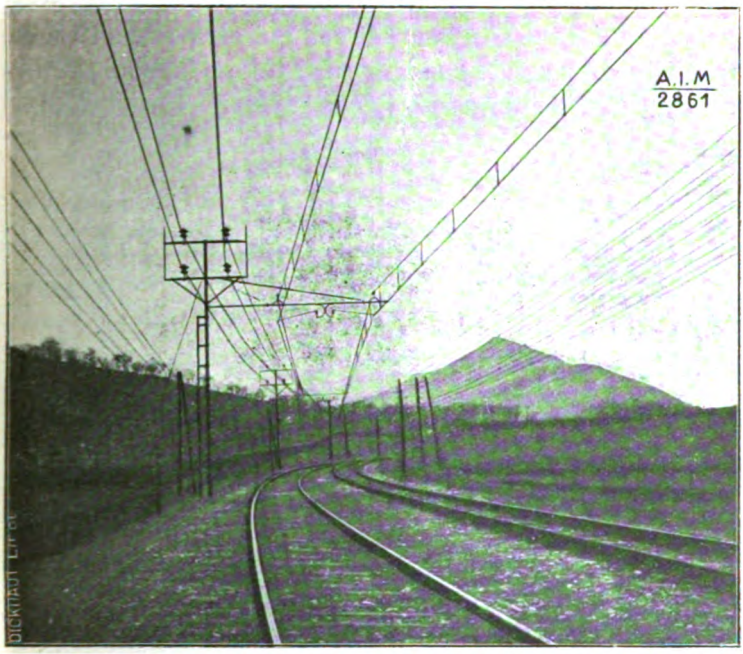


Fig. 9.

de Pierrefitte, que lorsqu'il se trouve à l'intérieur des courbes, car dans ce cas l'effet des différents fils ou câbles est en partie neutralisé par l'action de leur poids. Pour les alignements, le poteau a été étançonné ; à l'extérieur des courbes, le même poteau a été haubané (fig. 9).

Digitized by Google

L'utilisation des rails hors usage pour la construction des poteaux a été heureuse au point de vue économique parce que tout en ayant des poteaux environ deux fois plus lourds que des poteaux normaux en treillis, à cause de la mauvaise répartition du poids, le prix de revient de la matière était environ trois fois moindre que pour les profilés du commerce.

Au point de vue résistance, les poteaux en vieux rails ont donné également un bon résultat, quoique le centre de gravité soit situé très haut ; le rail qui est placé à l'avant, face à la voie, est de champ et résiste très bien au fléchissement dû à la charge des lignes.

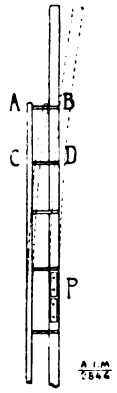


Fig. 10.

Leur point faible, c'est l'assemblage. Des essais méthodiques faits avant leur construction ont montré que, bien avant de fléchir, le rail tourne autour du point P (fig. 10) parce que les points de fixation tels que A, B, C, D des éclisses d'assemblage aux rails ne sont pas rigides ; il y a toute une série de parallélogrammes déformables qui permettent au rail antérieur de suivre le fléchissement du rail postérieur lequel, se présentant à la résultante des

Digitized by Google

forces agissantes sous son moment d'inertie le plus faible, fléchit assez facilement. L'étançonnage de ce poteau a été un remède très efficace et moins compliqué que tous les systèmes de renforcements diagonaux entre les deux rails.

La résistance de ces poteaux dans le sens parallèle à la voie est moins grande, mais les quatre câbles de la ligne de transmission, bien fixés à chaque poteau, empêchent ce dernier d'osciller par l'effet du vent.

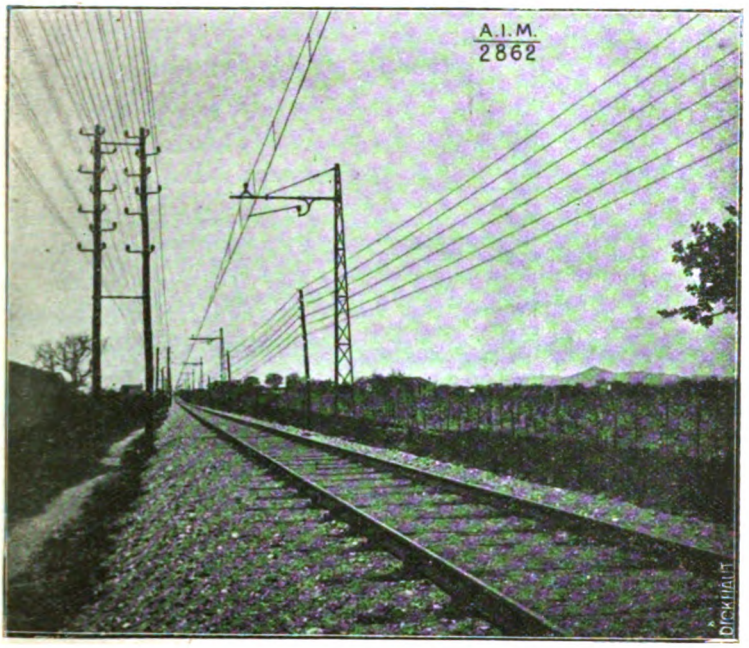


Fig. 11.

Pour les lignes Ille-Perpignan, Lourdes-Pau et Tarbes-Montréjeau, la Compagnie du Midi a été obligée d'adopter les poteaux treillis, car elle ne disposait plus de rails hors d'usage.

Digitized by Google

Pour la ligne Ille-Perpignan on a employé un poteau treillis très léger, de forme triangulaire, cette ligne n'ayant pas de transport de force (fig. 11). Dans les courbes et pour les ancrages, le poteau triangulaire a été remplacé par un poteau quadrangulaire (fig. 12).

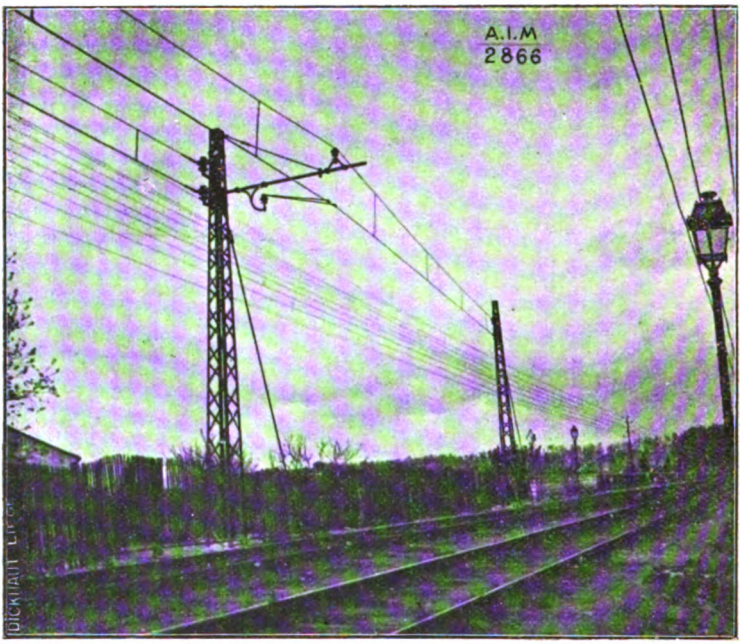


Fig. 12

Pour les lignes Lourdes-Pau et Tarbes-Montréjeau, c'est un poteau treillis quadrangulaire qui a été adopté, avec cadre extérieur pour supporter les quatre câbles à 60,000 volts. La position de ce cadre équilibre en partie le poids des deux lignes caténaires montées du côté opposé et contribue à diminuer le poids du poteau.

La manutention des poteaux treillis est très délicate,

Digitized by Google

surtout sur une ligne qui est régulièrement exploitée et sur laquelle la distribution du matériel doit se faire aussi vivement que possible.

On ne peut donc pas affirmer que le dernier mot soit en faveur des poteaux treillis : les installations du Simplon, avec des poteaux formés par des tubes assemblés, et du Mont Cenis avec des poteaux tubulaires Mannesmann nous autorisent à envisager d'autres solutions.

Tous les poteaux des installations des Pyrénées sont mis individuellement à la terre par une connexion à la voie. Ceux qui s'éloignent de la voie sont reliés ensemble par un fil de terre.

Isolation des lignes.

C'est seulement sur la ligne Lourdes-Pierrefitte qu'on a employé des isolateurs en porcelaine émaillée de couleur brune.

Sur les autres lignes, la Compagnie du Midi n'a employé que le verre. On craignait pour le verre une casse plus grande que pour la porcelaine : les faits ont prouvé que pendant le transport en chemin de fer le pourcentage supplémentaire de casse était négligeable ; au contraire, la manutention de ces isolateurs est plus délicate. On en casse davantage si l'on ne prend pas des précautions particulières.

Aux essais, ces isolateurs ne se sont pas montrés inférieurs à ceux en porcelaine. En ce qui concerne leur casse à cause des changements de température soudains, on n'a pas encore pu en faire une constatation précise : pour se prononcer à ce sujet, il faut attendre encore quelque temps.

L'isolateur en verre pour 60,000 volts est formé de quatre jupes scellées l'une sur l'autre : il a été essayé à sec à 150,000 volts et sous pluie à 100,000 volts.

L'isolateur en verre pour la ligne de traction est com-

Digitized by Google

posé de deux jupes et essayé à 50,000 volts à sec et 25,000 volts sous pluie.

Comme isolateurs d'arrêt pour la ligne à 12,000 volts, on en a employé de plusieurs sortes : l'isolateur Rosenthal, en porcelaine émaillée brune ; l'isolateur Hewlett, en porcelaine émaillée brune et l'isolateur Charbonnéaux, en verre, établi spécialement pour ces électrifications (fig. 12).

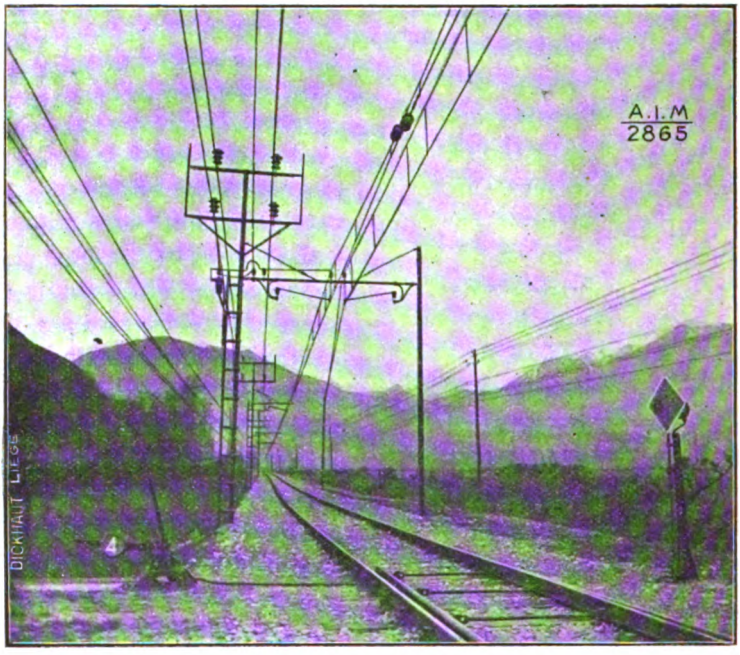


Fig. 13.

Jusqu'à présent, ces trois types d'isolateurs ont donné un bon résultat. Il est à noter que l'isolateur Hewlett, petit et léger, se prête spécialement pour les sectionnements placés au milieu d'une portée (fig. 13), car dans ces cas on ne dispose pas d'une hauteur assez grande. Mais il

Digitized by Google

est possible, comme il a été fait sur la ligne Ille-Perpignan, de placer ces sectionnements près d'une console ; de cette manière on peut se passer d'isolateurs d'arrêt trop petits.

Pour les lignes de transmission à 60,000 volts, il y a partout quatre conducteurs, formant deux lignes distinctes : si l'une est en réparation, l'autre fonctionne.

Pour la ligne de traction, l'exploitation électrique est à la merci d'un isolateur qui casse. Il est vraiment curieux que pour les lignes de traction à 500 ou 700 volts on s'est toujours préoccupé de la double isolation (considérée du reste d'une façon incomplète), tandis que pour les tensions élevées et pour des exploitations plus importantes on n'a employé en général que la simple isolation.

Cette question est d'une importance capitale et il est grand temps qu'on y songe pour toute électrification à faire. On serait tenté de se demander pourquoi les services du contrôle s'opposent à la mise en exploitation d'une ligne où un coefficient de sécurité est égal à 3 au lieu de 5 et permettent l'ouverture d'une exploitation d'une ligne où les isolateurs fument leur pipe ou risquent, pour un simple coup de pierre, d'arrêter toute une exploitation.

Il semble donc que les Compagnies de chemins de fer devraient envisager l'emploi de la double isolation, mais, contrairement à ce qui a été fait jusqu'à présent pour les réseaux urbains, d'une façon plus complète. Il est, en effet, bien inutile d'avoir sur une ligne la double isolation si l'on n'a pas la possibilité de s'apercevoir que l'une de ces isolations est défectueuse ; si l'on ne peut s'en apercevoir, on ne répare pas jusqu'à ce que la deuxième isolation cède. C'est celà qui est à éviter, parce qu'il faut empêcher l'arrêt du courant.

Digitized by Google

Lignes caténaires.

Les dernières figures montrent la simplicité des lignes caténaires construites sur les différents tronçons mentionnés. Le câble porteur a 40 mm² de section ; le fil de contact est en cuivre profilé et a 100 mm² de section. L'ensemble se présente très souple et donne un bon résultat à des vitesses dépassant 100 km. à l'heure. Pour les vitesses supérieures, qu'on envisage déjà, on ne peut pas encore se prononcer sur l'effet de la rigidité d'un fil de 100 mm² sur les archets : il faut attendre les résultats d'exploitation aux vitesses actuelles. En tout cas, le système de ligne actuel permettrait l'emploi d'un système bifilaire ou multifilaire : par exemple, deux fils de contact de 50 mm² chacun à la place d'un seul fil de 100 mm². On a déjà subdivisé la prise de courant pour améliorer le fonctionnement et on a obtenu un progrès réel. Il est probable qu'en faisant une ligne caténaire triangulaire on aurait des résultats très convenables aux vitesses élevées.

A l'exception de la ligne Lourdes-Pierrefitte, où les consoles et les différents supports sont en fer profilé, sur les autres lignes on a employé des consoles tubulaires et des pièces en acier coulé, ce qui donne à l'ensemble un cachet d'élégance.

La différence de prix entre la console tubulaire et celle en fer profilé n'est pas aussi grande qu'on pourrait le croire. La principale raison pour laquelle on doit quelquefois se contenter du fer profilé, c'est le délai de livraison des pièces en acier coulé ou en fonte malléable qui sont presque indispensables pour une construction tubulaire. Les fonderies ont été tellement surchargées ces derniers temps qu'il leur était impossible non seulement de promettre de brefs délais, mais d'accepter des pénalités pour les délais qu'elles-mêmes donnaient.

Digitized by Google

Gares et interrupteurs.

La fig. 14 montre la gare d'Ossun équipée pour l'électrification. On voit qu'on a employé presque partout des portiques, ce qui assure une grande solidité à la construction. Comme pour les consoles, ces portiques sont formés par du tube 45 × 55.

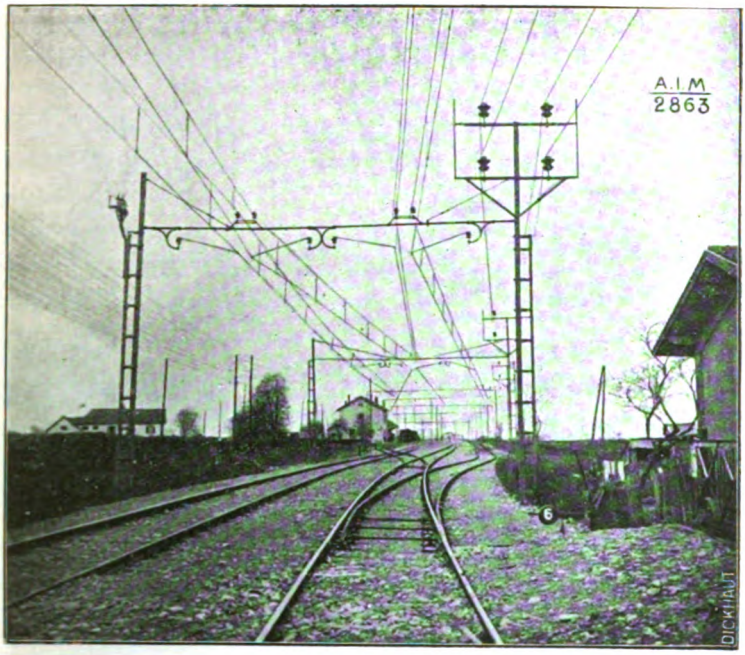


Fig. 14.

Il est conseillable d'employer un portique à trois supports lorsque la portée dépasse 14 à 15 mètres. Parfois la largeur de l'entre-voie n'a pas permis l'emploi d'un poteau normal : on a alors employé, un poteau formé par deux rails assemblés. Il y a eu aussi des cas où l'emploi de tout poteau intermédiaire était impossible. On a quand

Digitized by Google

même employé le même tube pour des portiques de 18 à 20 mètres, mais les poteaux d'extrémité étaient plus solides et plus hauts que les poteaux ordinaires et l'horizontalité du portique était assurée non par des haubans mais par une construction caténaire. Cette construction est bien moins coûteuse que celle en treillis.

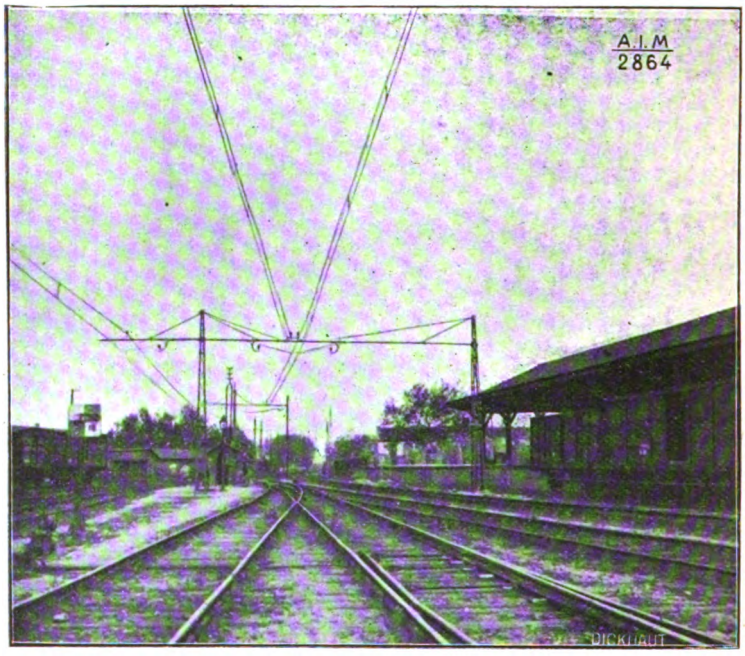


Fig. 15.

Dans une ligne où l'on emploie exclusivement les poteaux treillis, comme sur la ligne d'Ille à Perpignan, la construction par portiques se présente comme il est indiqué dans la fig. 15.

Plusieurs parmi les figures présentées jusqu'ici — en particulier la fig. 14 — montrent clairement comment on

Digitized by Google

a fait les aiguillages, point très important, car plusieurs d'entre eux sont franchis par les rapides à une vitesse élevée (80 à 90 km. à l'heure). On voit qu'on n'a pas utilisé de pièces spéciales : on s'est borné à assurer aux deux fils de contact le même niveau. Lorsque l'angle de l'aiguillage est bien pris et les deux câbles porteurs tendus également, ce genre d'aiguillage, qui est le plus simple, est aussi le meilleur.

Il est à noter que les voies d'évitement, là où il était possible, ont comme fil de contact du cuivre de 50 mm² au lieu de 100 mm². Pour des gares importantes, où l'équipement d'un faisceau de voies avec du cuivre représenterait une dépense considérable, on pourrait préconiser l'emploi du fil d'acier profilé. On sait que sur le New-York New-Haven, dans les tramways départementaux de la Haute-Vienne, et encore en d'autres endroits, on a déjà employé avec succès le fil de contact en acier, en parallèle avec un feeder plus ou moins important, en cuivre ou aluminium.

Aussi bien pour la simple que pour la double voie, les lignes ne peuvent être coupées que dans les gares : la distance entre gares varie de 3 à 10 km. En coupant un tronçon à deux gares consécutives, on peut le mettre à la terre et y faire les réparations nécessaires. Les interrupteurs utilisés à cet effet sont à cornes, montés sur les même poteaux des lignes (fig. 14) et manœuvrés du bas au moyen d'un jeu de pignon et crémaillère. Les voies d'évitement peuvent, elles aussi, être coupées, mais à l'aide d'un simple interrupteur à couteau, qui est manœuvré également du bas d'un poteau.

Dans les gares importantes on a installé des jeux d'interrupteurs destinés à couper n'importe quelle ligne d'un poste central. Cette mesure était indispensable, surtout pour les voies au-dessous des marquises. Bien souvent,

Digitized by Google

en effet, la hauteur de ces dernières oblige à installer la ligne à une faible hauteur, de sorte qu'entre les toits du matériel roulant et le fil de contact il n'y a que 1 mètre ou 1 mètre 50, ce qui serait plutôt dangereux pour le personnel affecté à l'entretien et à l'éclairage des voitures voyageurs.

Les parafoudres se trouvent aussi dans les gares : ils sont à cornes, avec résistance formée par un retour dans la terre, de longueur appropriée.

Éclissage électrique.

L'éclissage électrique des voies est fait, sur chaque rangée de rails, au moyen d'éclisses en cuivre formées par plusieurs lames flexibles superposées. Ce type d'éclissage a été étudié par le Service de la voie de la Compagnie des chemins de fer du Midi. Leur forme spéciale permet de les adapter dans les mêmes trous que les boulons d'éclisse mécanique.

On essaye également une éclisse mécanique qui devrait en même temps assurer l'éclissage électrique. Cette éclisse n'est pas galvanisée : au moment de la pose elle est simplement nettoyée, ainsi que les champignons des rails contre lesquels elle doit être serrée.

Tous les 300 mètres, les deux ou quatre rangées de rails sont réunies entre elles par une connexion en cuivre.

A des endroits appropriés — et environ tous les quatre ou cinq kilomètres — on a établi de bonnes terres en connectant la voie à des plaques ou coupons de rails enfoncés dans le sol humide.

Tous les travaux, dont je viens de donner une description ont été menés vivement, d'abord parce que la Compagnie des chemins de fer du Midi avait préparé pour les constructeurs un programme bien déterminé ; ensuite, parce qu'ils ont été confiés à un entrepreneur de travaux publics, M. Thévenot. L'avantage de cette solution est

Digitized by Google

que chez l'entrepreneur, contrairement à ce qui se passe souvent dans les grandes Sociétés, il y a une unité d'action absolue : l'ingénieur qui dirige les travaux a les pouvoirs les plus étendus et peut prendre toute initiative. Dans certains cas particulièrement importants, il n'a pas à attendre le résultat de délibérations pour opérer : il voit son patron, ou bien il lui téléphone, on décide et on se remet au travail. C'est ainsi qu'on peut travailler bien et économiquement, car de cette organisation ressort tout de suite la presque suppression des frais pour imprévus.

Les résultats déjà obtenus dans l'électrification des lignes pyrénéennes font grand honneur à la Compagnie des chemins de fer du Midi ; cette Compagnie s'est lancée la première dans l'électrification des grandes lignes de chemins de fer, au moment où l'on commençait à peine à entrevoir la solution de certains problèmes ; elle mérite d'être choisie comme exemple pour les nouvelles installations analogues.

(*Applaudissements*).

M. H. Chauvin, *président*, se fait l'interprète de l'assemblée en félicitant l'orateur dont la conférence, accompagnée de nombreuses projections lumineuses, a été suivie avec un vif intérêt.

Il le remercie particulièrement de s'être imposé ce long voyage, de la région des Pyrénées à Liége, pour venir nous exposer les résultats de l'expérience qu'il a acquise dans cette importante question de l'électrification des grandes lignes de chemin de fer.

La séance est levée à 22 heures.

Digitized by Google

SÉANCE DU 18 MAI 1913.

M. J. Libert, *vice-président,* au fauteuil.

Ont signé la liste de présence : MM. Calmeau, Comas, De Bast, Eichenwald, Gerard, A., Henrion, Küntziger, Libert, Mourachow, Nollet, Roselier.

M. H. Chauvin se fait excuser.

M. J. Libert donne la parole au camarade **E. Roselier** pour sa communication concernant les procédés industriels de fabrication, par voie électrique, des composés oxygénés de l'azote.

Le texte de cette conférence sera publié ultérieurement.

M. J. Libert remercie l'orateur, dont l'exposé, accompagné de projections lumineuses a été suivi avec vif intérêt.

La séance est levée à 22 heures.

Digitized by Google

SÉANCE DU 25 MAI 1913.

M. H. Chauvin, *président*, au fauteuil.

Ont signé la liste de présence : MM. Allard, Biske, Can, Chauvin, De Bast, Defize, Duculot, Duquesne, Henrion, Küntziger, Levitous, Mielczarski, Mossay, Moineau V., Nollet, Uytborck, Watelet, Zlatine.

M. H. Chauvin dépose sur le bureau les ouvrages suivants offerts à l'Association :

Installations téléphoniques. Guide pratique, par J. Schils, 3e édition ; H. Dunod et E. Pinat, Paris, 1913.

Descrizione una Machinetta elettro-magnetica del Dr Antonio Pacinotti, publicato dall' Associazone ellettrotecnica italiana col concorso del Ministerio della pubblica istruzione ; Bergamo, 1912.

Tre anni di Aviazione nella brughiera di Somma Lombardo. Cenni e ricordi con parole di presentazione del Senatore Giovanni Celoria ; Tip. Union Cooperativa Milano, 1913.

Le camarade **P.-A. Mossay** prend la parole pour développer sa communication sur les méthodes de mesure du rendement et du facteur de puissance des moteurs d'induction.

Le Président, au nom de l'assemblée, remercie l'orateur, dont la conférence, très documentée, a été fort appréciée. Le *Bulletin* en publiera prochainement le texte.

La séance est levée à 12 heures.

Digitized by Google

MÉMOIRES

621.312.16

Note sur le calcul des pôles de commutation.

Dans une dynamo à courant continu pourvue de pôles de commutation, fig. 1, abstraction faite de la dispersion de l'armature, désignons par $\mathfrak{N}$ le flux magnétique traversant l'entrefer d'un pôle principal et par $\mathfrak{N}'$ le flux magnétique traversant l'entrefer d'un pôle auxiliaire. A travers l'induit, le flux a, par raison de symétrie, une même valeur numérique $\mathfrak{N}_1$ dans les demi-pas polaires AB et CD, et une même valeur numérique $\mathfrak{N}_2$ dans les demi-pas polaires BC et DA.

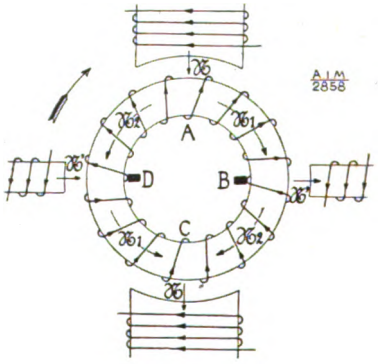


Fig. 1.

Comptons les divers flux positivement dans les sens indiqués par les flèches. L'application de la première loi

Digitized by Google

de Kirchoff au noyau de l'induit sous un pôle principal et sous un pôle auxiliaire donne les relations

$$\mathfrak{N} = \mathfrak{N}_1 + \mathfrak{N}_2 \quad \text{et} \quad \mathfrak{N}' = \mathfrak{N}_1 - \mathfrak{N}_2.$$

On en déduit

$$\mathfrak{N}_1 = \frac{\mathfrak{N} + \mathfrak{N}'}{2} \quad \text{et} \quad \mathfrak{N}_2 = \frac{\mathfrak{N} - \mathfrak{N}'}{2}.$$

Les flux principaux et les flux auxiliaires de la machine, considérés séparément, suivent donc les trajectoires dessinées respectivement en trait pointillé et en trait ponctué dans la fig. 2.

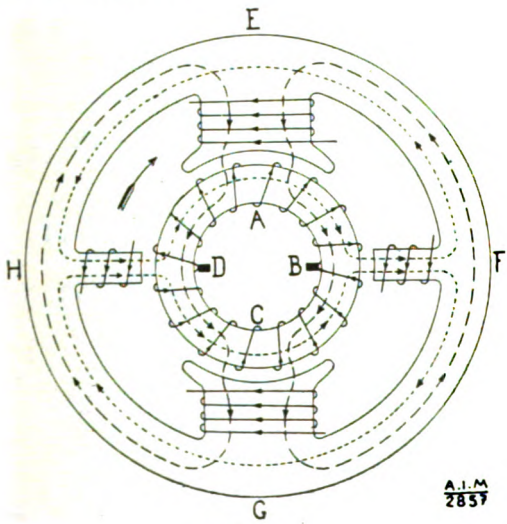


Fig. 2.

Soient $\mathfrak{F}$, $\mathfrak{F}'$ et $\mathfrak{F}_0$ les forces magnétomotrices développées par la bobine d'un noyau inducteur principal, la bobine d'un noyau inducteur auxiliaire et la partie de l'enroulement induit correspondant à un demi-pas polaire ; ν et ν' les coefficients de dispersion relatifs aux pôles

Digitized by Google

principaux et aux pôles auxiliaires ; $\mathcal{R}$ et $\mathcal{R}'$ les reluctances d'un entrefer principal et d'un entrefer auxiliaire ; $\mathcal{R}_i$ et $\mathcal{R}'_i$ les reluctances d'un noyau inducteur principal et d'un noyau inducteur auxiliaire, y compris la pièce polaire attenante ; $\mathcal{R}_a$ la reluctance d'un demi-pas polaire d'induit, supposée la même pour les inductions déterminées par les flux $(\mathfrak{N} + \mathfrak{N}')/2$ et $(\mathfrak{N} - \mathfrak{N}')/2$; $\mathcal{R}_c$ la reluctance d'un demi-pas polaire de culasse, supposée la même pour les inductions déterminées par les flux $(\nu\,\mathfrak{N} + \nu'\,\mathfrak{N}')/2$ et $(\nu\,\mathfrak{N} - \nu'\,\mathfrak{N}')/2$.

En appliquant la seconde loi de Kirchoff aux deux contours fermés, tels que ABFE et ADHE, qu'un des noyaux inducteurs principaux forme avec les noyaux inducteurs auxiliaires entre lesquels il est compris, on voit que

$$\begin{aligned}\mathfrak{F} - \mathfrak{F}_0 + \mathfrak{F}' &= \nu\,\mathfrak{N}\,\mathcal{R}_i + \mathfrak{N}\,\mathcal{R} + \frac{\mathfrak{N} + \mathfrak{N}'}{2}\,\mathcal{R}_a + \mathfrak{N}'\,\mathcal{R}' \\ &\quad + \nu'\,\mathfrak{N}'\,\mathcal{R}'_i + \frac{\nu\,\mathfrak{N} + \nu'\,\mathfrak{N}'}{2}\,\mathcal{R}_c \\ &= \mathfrak{N}\left(\nu\,\mathcal{R}_i + \mathcal{R} + \frac{\mathcal{R}_a}{2} + \frac{\nu\,\mathcal{R}_c}{2}\right) \\ &\quad + \mathfrak{N}'\left(\nu'\,\mathcal{R}'_i + \mathcal{R}' + \frac{\mathcal{R}_a}{2} + \frac{\nu'\,\mathcal{R}_c}{2}\right)\end{aligned}$$

et

$$\begin{aligned}\mathfrak{F} + \mathfrak{F}_0 - \mathfrak{F}' &= \nu\,\mathfrak{N}\,\mathcal{R}_i + \mathfrak{N}\,\mathcal{R} + \frac{\mathfrak{N} - \mathfrak{N}'}{2}\,\mathcal{R}_a - \mathfrak{N}'\,\mathcal{R}' \\ &\quad - \nu'\,\mathfrak{N}'\,\mathcal{R}'_i + \frac{\nu\,\mathfrak{N} - \nu'\,\mathfrak{N}'}{2}\,\mathcal{R}_c \\ &= \mathfrak{N}\left(\nu\,\mathcal{R}_i + \mathcal{R} + \frac{\mathcal{R}_a}{2} + \frac{\nu\,\mathcal{R}_c}{2}\right) \\ &\quad - \mathfrak{N}'\left(\nu'\,\mathcal{R}'_i + \mathcal{R}' + \frac{\mathcal{R}_a}{2} + \frac{\nu'\,\mathcal{R}_c}{2}\right).\end{aligned}$$

Digitized by Google

Par addition et soustraction, on tire de ces équations

$$\mathcal{F} = \mathcal{N}\left(\nu\,\mathcal{R}_i + \mathcal{R} + \frac{\mathcal{R}_a}{2} + \frac{\nu\,\mathcal{R}_c}{2}\right)$$

et

$$\mathcal{F}' = \mathcal{N}'\left(\nu'\,\mathcal{R}'_i + \mathcal{R}' + \frac{\mathcal{R}_a}{2} + \frac{\nu'\,\mathcal{R}_c}{2}\right) + \mathcal{F}_0.$$

Ce sont là les formules qui permettent de calculer les forces magnétomotrices que doivent produire chacune des bobines inductrices principales et chacune des bobines inductrices auxiliaires pour l'obtention de flux donnés dans les entrefers principaux et dans les entrefers auxiliaires.

En négligeant les reluctances $\mathcal{R}_a$ et $\mathcal{R}_c$, beaucoup d'auteurs écrivent la dernière formule sous la forme simplifiée

$$\mathcal{F}' = \mathcal{N}'\,(\nu'\,\mathcal{R}'_i + \mathcal{R}') + \mathcal{F}_0.$$

OMER DE BAST.

Digitized by Google

351.82 : 621.316 **Une législation en matière de distribution d'énergie électrique est-elle désirable en Belgique ?**

(Publication anticipative de la communication faite par M. E. UYTBORCK à la séance du 15 juin 1913).

MESSIEURS,

Excusez-moi de me présenter à cette tribune, non pour développer des considérations d'ordre technique ou scientifique qui font d'habitude l'objet de vos réunions, mais avec l'idée bien arrêtée de vous parler d'une question d'économie politique. L'économie politique se définit en effet : la science qui traite de la production, de la répartition et de la consommation des richesses. Vous parler de législation en matière de distribution d'énergie électrique, c'est en effet, Messieurs, vous parler d'économie politique puisque le but d'une telle législation ne peut être que de régler le développement normal des réseaux de distribution d'électricité, c'est-à-dire d'assurer la répartition dans toute l'étendue de vastes régions d'un agent procédant directement des richesses naturelles du pays.

Ne dirait-on pas, Messieurs, en écoutant les termes de la définition de l'économie politique : production, répartition et consommation, que l'on ait voulu laisser sous-entendre qu'il s'agit en ligne principale de l'électricité. Sans vouloir aller aussi loin, nous devons reconnaître que cet agent, dont la nature intime est encore quelque peu mystérieuse, est un des facteurs primordiaux de civilisation et de progrès économique.

Digitized by Google

N'a-t-on pas dit que l'on peut mesurer l'état de civilisation d'un peuple à la façon dont il s'éclaire ? Or, le Conseil d'Etat en France vient [1], pour clore un débat sensationnel, de décréter que l'électricité est le mode d'éclairage le plus perfectionné ; d'autre part, on sait que l'électricité peut être considérée comme le mode le plus perfectionné de transport d'énergie, puisqu'il est le seul qui permette à la fois l'installation pratique, hygiénique et économique de gros moteurs industriels et de petits moteurs domestiques, pour l'industrie à domicile et même en chambre. Dès lors, il semble que l'on puisse affirmer aujourd'hui qu'un peuple marche sûrement dans la voie du progrès quand il augmente sa consommation d'énergie électrique.

Messieurs, j'ai intentionnellement donné la forme interrogative au titre de ma causerie, non parce qu'il y a doute dans mon esprit sur le sens affirmatif qu'il importe de donner à la réponse, mais parce que mon intention n'est pas aujourd'hui de vous présenter et de défendre devant vous un système complet de législation. Je me bornerai à vous exposer d'une part, d'une façon aussi succincte que possible, l'état de législation dans les pays qui nous ont devancés et de vous énumérer, d'autre part, les lacunes que la législation désirable en Belgique devrait combler.

La Belgique est un trop petit pays pour que nous puissions nous dispenser d'étudier ce qui se fait au dehors. Nous y trouverons pour le sujet qui nous occupe d'utiles enseignements.

C'est incontestablement l'*Angleterre* qui a pris les devants en fait de législation sur les distributions d'énergie électrique. Dès 1882, un acte du Parlement fixait les conditions dans lesquelles devait s'exercer l'industrie

(1) *Lumière électrique*, 3 mai 1913.

Digitized by Google

électrique ; cet acte avait pour principal but de s'opposer à ce que la distribution de l'électricité devînt le privilège de l'industrie privée. D'après cet acte les concessions de distribution étaient accordées par le Board of Trade après consentement de la municipalité. Dans le cas où la Municipalité refusait son consentement, l'entrepreneur pouvait demander qu'un acte du Parlement lui accordât l'autorisation de distribuer. Une autre disposition capitale de cette loi autorisait les municipalités à racheter, au dixième de sa valeur, toute l'installation de l'exploitant au bout d'une période de 21 ans (disposition analogue à celle qui figurait dans une loi de 1870 relative aux tramways).

La période qui a suivi immédiatement la mise en vigueur de l'acte de 1882 a été néfaste au point de vue du développement des distributions d'électricité en Angleterre. Lord Herschell déclarait à la Chambre des Lords, en 1888, que dans les îles des mers du Sud, la lumière électrique était plus employée qu'à Londres.

L'acte de 1888 vint améliorer la situation en portant à 42 ans la période après laquelle le rachat des installations pouvait être fait par la municipalité. Cet acte donnait de nouveaux pouvoirs au Board of Trade en lui permettant d'accorder dans des cas spéciaux des concessions de distributions, sans le consentement de la municipalité. Au surplus, dans le cas où la municipalité n'exploite pas elle-même, le Board of Trade peut, à la demande de la municipalité ou de l'exploitant, ou d'au moins vingt consommateurs, reviser les clauses de l'acte de concession relatives aux tarifs maximum.

Enfin, un dernier acte du Parlement promulgué en 1909, a pour objet de garantir aux entreprises d'électricité le droit d'expropriation des propriétés privées, pour ce qui concerne l'établissement des stations génératrices ; l'autorisation de poser les lignes primaires sur les propriétés

Digitized by Google

privées pouvant être accordée par une disposition spéciale de l'acte de concession.

En résumé, l'Etat contrôle de très près l'industrie de la distribution d'énergie électrique en Angleterre. Il n'y a presque jamais concurrence quand la distribution d'électricité est exploitée par les municipalités, mais cette concurrence existe quand la distribution est assurée par des Compagnies, tout au moins dans Londres et les environs. A ma connaissance, le Board of Trade n'a jamais admis, pour un même district, plus de deux concurrents.

Il est intéressant de dire quelques mots des exploitations d'électricité faites par les régies en Angleterre. Dans ce pays, on considère généralement M.Chamberlain comme le père du municipalisme. Voici comment cet homme célèbre l'a défini :

« 1° Le rôle de la municipalité ne consiste pas seulement » à nettoyer les rues et à maintenir le bon ordre, la munici- » palité doit pourvoir à ce que les pauvres aient l'usage » collectif de tous les biens dont les riches seuls ont l'usage » individuel : villas, parcs, bibliothèques, collections de » tableaux, objets d'art, eau, lumière en abondance, bains, » écoles, logements sains, etc.

» 2° Pour se procurer les ressources nécessaires à toutes » ces entreprises, *sans augmenter les taxes municipales ou » même en les supprimant,* il suffit de se lancer dans la voie » des exploitations industrielles, en exploitant d'abord di- » rectement les monopoles que les municipalités concé- » daient jusque-là à des Compagnies; et si cela ne suffit » pas en faisant concurrence à l'industrie privée. »

Le municipalisme a donné de brillants résultats à Birmingham, grâce aux aptitudes remarquables de M. Chamberlain qui en a surveillé la bonne marche. Ces résultats brillants encouragèrent les autres municipalités

Digitized by Google

à entrer dans la même voie. Aujourd'hui, on peut compter en Angleterre 244 villes exploitant en régie les réseaux de distribution d'électricité, 174 les tramways, 265 l'éclairage au gaz et 1,045 les services d'alimentation d'eau. Ce développement considérable ne devrait pas être interprété comme déterminatif de l'heureux résultat financier de ces exploitations. Evidemment, les rapports que dressent les autorités locales sont toujours, on le sait, d'un optimisme rassurant jusqu'au moment où le parti adverse arrive au pouvoir. Lord Avebury a signalé dans un livre très documenté les abus du municipalisme et de l'étatisme en Angleterre. Cet homme d'Etat admettrait tout au plus les régies dans les cas, extrêmement rares, où elles réalisent des bénéfices réels, qui d'après lui seront toujours inférieurs aux redevances qu'auraient payées les Compagnies concessionnaires. Malgré les ressources que les exploitations en régies ont données aux municipalités, les impôts municipaux ont crû dans ces dernières années dans une proportion énorme. Ils atteignaient en 1875, 19.000.000 liv. sterl.; en 1903, ils s'élevaient à 50.000.000 liv. sterl. Par tête d'habitant, en 1898, ils s'élevaient à 9 liv. sterl., et en 1902, à 11 liv. sterl.

L'influence néfaste d'un contrôle excessif de l'Etat, en matière de prescriptions techniques à observer pour l'établissement des lignes sur le domaine public en Angleterre, a paralysé les efforts de bien des entreprises et il en résulte que la situation de ce pays est actuellement bien inférieure à celle de la France, au point de vue du développement des distributions régionales.

Il n'existe à proprement parler pas de législation en *Allemagne* ; de nombreuses villes, ne trouvant pas de concessionnaires, ont exploité elles-mêmes leurs réseaux de distribution. Il n'est pas d'usage en Allemagne, pas davantage qu'en Angleterre du reste, de délivrer à des

Digitized by Google

entreprises des concessions séparées pour la distribution de l'énergie électrique destinée à la production de la lumière d'une part, et à la force motrice et autres usages industriels, d'autre part. Une concurrence sans aucun monopole et sans aucune concession n'existe que dans de petites localités qui n'ont aucune expérience en la matière. Il arrive aussi que dans un même district deux sociétés s'occupent de l'alimentation d'une localité. En général ces sociétés s'entendent pour le partage du territoire à desservir. Il est très difficile momentanément d'obtenir le droit d'expropriation pour l'installation des canalisations électriques sur le domaine privé ; on prépare dans ce pays une loi pour régler cette question ; il y a cependant quelques centrales qui l'ont obtenu.

Une statistique signale qu'en 1910, parmi 58 villes ayant plus de 50.000 habitants, 44 ont une régie de gaz, 43 une régie d'eau, 38 une régie d'électricité, 10 une régie de tramways. M. Bidault des Chaumes, dans un article paru dans le Génie civil du 5 avril 1913, sur les régies municipales dans l'Europe contemporaine, déclare qu'une réaction commence à se dessiner en Allemagne contre les exploitations municipales. Les bourgmestres se plaignent d'être livrés à la merci des meneurs des syndicats ouvriers. L'organisation des municipalités, en Allemagne, est pourtant plus favorable que partout ailleurs à une exploitation industrielle, puisque les bourgmestres sont des fonctionnaires de carrière, ce qui est certes plus propre à leur donner le temps et la préparation nécessaires à la direction des exploitations en régie.

En *France*, la législation et la réglementation en matière de distribution d'électricité sont très détaillées, à tel point que le recueil des lois, décrets, arrêtés et circulaires sur la matière ne comprend pas moins de 400 pages. La loi française du 15 juin 1906 définit trois régimes sous

Digitized by Google

lesquels peuvent se faire les installations de distribution d'énergie sur la voirie publique.

1° Le régime des permissions de voirie, dont les cas d'application ont été récemment limités, dans une circulaire du 5 octobre 1912.

2° Le régime des concessions simples sans déclaration d'utilité publique ; ce régime implique le monopole pour l'éclairage et la libre concurrence pour la force motrice.

3° Le régime de concessions déclarées d'utilité publique, identique aux précédents en ce qui concerne le monopole pour l'éclairage et la libre concurrence pour la force motrice, confère à l'exploitant le droit de l'expropriation des propriétés privées.

Les formalités pour l'obtention de ce dernier régime sont plus longues ; mais l'avantage qu'il entraîne pour les grandes entreprises est très appréciable, car l'industriel est dans ce cas véritablement aidé par l'Etat dans la réalisation de son projet.

Les années qui ont suivi la promulgation de la loi de 1906 ont vu un prodigieux développement des réseaux d'électricité ; les régions industrielles de la France sont toutes munies actuellement de réseaux à haute tension. Une très grande partie de ces réseaux cependant ont été établis sous le régime des permissions de voirie et non celui des concessions, parce que les formalités et les obligations qu'entraîne l'octroi de concessions sont respectivement plus longues et plus draconiennes que celles nécessitées pour l'obtention de permissions de voirie. L'administration française s'est rapidement aperçue de ce que l'on faisait fausse route et que les réseaux étendus des permissionnaires feraient un jour obstacle à l'établissement des réseaux réguliers de concessionnaires tenus à des obligations bien définies par contrat. Aussi une circulaire toute récente du mois d'octobre dernier, ne modi-

Digitized by Google

fiant pas la loi de 1906, est-elle venue rétablir les choses dans leur état normal. Dorénavant, les installations d'un permissionnaire ne pourront jamais faire obstacle à l'établissement des réseaux des concessionnaires, et les installations du premier doivent devenir, moyennant indemnité fixée à dire d'experts, la propriété des seconds.

La loi française base toute son économie sur la libre concurrence, pour la distribution de l'énergie électrique à employer pour d'autres usages que l'éclairage ; cette concurrence est effectivement constatée dans les grands centres où la coexistence de plusieurs réseaux est rendue possible par suite de la forte densité de la population. Elle ne réserve aucun privilège aux régies municipales qui, si elles désirent s'organiser pour la vente de l'énergie électrique, doivent se soumettre aux mêmes conditions que des particuliers ou sociétés. Le municipalisme en matière de distribution d'énergie électrique s'est infiniment peu développé en France, parce que le Conseil d'Etat retient les municipalités dans cette voie qu'il considère comme entraînant des risques inutiles pour les finances municipales. Aussi ne compte-t-on en France que quelques régies qui sont d'importance secondaire.

La législation *suisse* en matière de distribution de l'énergie électrique est excessivement simple. On y lit que l'expropriation du domaine public et privé pour le passage des canalisations peut toujours s'obtenir. Quand l'expropriation du domaine communal est demandée pour la distribution de l'énergie électrique, la commune peut, aux fins de protéger ses intérêts légitimes, la refuser, ou la subordonner à des conditions restrictives, sauf dans le cas où l'énergie est destinée à l'exploitation électrique d'un chemin de fer; mais un recours au gouvernement cantonal et au conseil fédéral est ouvert aux intéressés contre les décisions des communes. La principale source

Digitized by Google

de l'énergie électrique étant constituée, en Suisse, par les chutes d'eau très éloignées des centres de consommation, le législateur a donné de grandes facilités pour l'expropriation des propriétés privées nécessaires à l'installation des lignes à haute tension. Aussi voit-on toujours en Suisse les lignes primaires suivre non pas les routes, mais à travers champs, forêts, montagnes, suivre les tracés les plus directs.

La législation suisse comprend des règlements techniques très précis et très détaillés ; ils peuvent servir de modèle à bien des administrations ; les ingénieurs qui ont à établir des installations de transport d'énergie y trouveront consignées des règles qui ne les égareront jamais et qui leur feront toujours réaliser des ouvrages possédant un caractère de sécurité et de durabilité bien approprié au but à atteindre.

La Suisse allemande est une des parties de l'Europe où le municipalisme existe depuis le plus long temps. Depuis plusieurs centaines d'années, en effet, les municipalités y ont géré un patrimoine important de forêts et de pâturages ; dans les cantons de la Suisse française, les lois réduisent sensiblement l'autonomie des communes. Les régies municipales s'occupant de distribution d'électricité sont très nombreuses en Suisse. Si les exploitations en régies, dans ce pays, ont en général donné de meilleurs résultats qu'ailleurs, il faut en rechercher la cause dans le fait qu'aucun parti politique n'a inscrit des exploitations en régie à son programme.

Dans les grandes villes suisses, la concurrence, qui existait jadis très vive, a disparu parce que les Sociétés d'Electricité ont conclu des accords basés sur des délimitations de territoire ; d'autre part, dans les campagnes très peuplées, la lutte entre concurrents est parfois très vive encore.

Digitized by Google

Il n'y a pas, à proprement parler, occupation d'un même territoire par deux rivaux ; mais comme les rayons d'action ne sont pas nettement définis, il se produit, sur les limites des régions desservies, par chaque exploitant des luttes très vives dont les communes se hâtent de profiter. On signale que dans les environs de Berne, l'enchevêtrement des réseaux est inextricable.

En *Italie*, les municipalités ne sont pas autorisées à délivrer des concessions exclusives. Il faut, pour établir une distribution d'énergie électrique, obtenir du préfet une autorisation. La libre concurrence existe réellement et l'on voit très souvent différentes Sociétés dans la même ville. Cette concurrence est spécialement faite aux sociétés privées par les municipalités (Rome, Milan, Turin). A Naples, Gênes, Florence, plusieurs sociétés se font la concurrence.

La loi du 7 juin 1894 fixe la procédure à suivre pour l'expropriation des propriétés privées nécessaire à l'établissement des canalisations électriques. Tout propriétaire est tenu de permettre le passage, au travers de ses terrains, des conducteurs électriques aériens ou souterrains, permanents ou temporaires, à condition que l'autorité préfectorale ait reconnu l'installation d'utilité publique ou industrielle.

Les lignes primaires sont plutôt installées en pleine campagne que le long des routes. Le municipalisme, en Italie, est soigneusement réglementé, il ne peut s'exercer que par l'intermédiaire d'une agence ou Commission élue par le Conseil municipal, en dehors de ses membres. La gestion de cette Commission est contrôlée par le Conseil municipal et par le préfet. De telles dispositions légales favorisent la municipalisation en ce sens qu'elles empêchent des tentatives malheureuses qui pourraient enlever tout désir de municipalisations nouvelles.

Digitized by Google

L'*Espagne* jouit également du régime de la libre concurrence pour les distributions de l'électricité ; la concurrence existe réellement dans les centres importants. A Madrid, notamment, plusieurs Sociétés se disputent la faveur du client.

La loi du 25 mai 1900 règle les conditions dans lesquelles on peut obtenir le droit d'expropriation du domaine de l'Etat, de la Province ou de la Commune, pour la pose de canalisations ; quand il y a utilité publique, l'expropriation peut également atteindre les propriétés privées. La loi fixe d'une façon très précise les délais accordés aux différentes administrations pour les permissions de voirie.

En *Suède*, la loi du 27 juin 1902, complétée par celle du 31 août 1907, stipule que le droit d'expropriation pour l'établissement des lignes de transport sur les terrains publics et privés peut être accordé par le Conseil d'Etat, s'il s'agit d'une ligne ayant un intérêt public ou un intérêt industriel d'une importance considérable. Ce droit ne s'étend pas aux rues et places publiques dans les villes ; celles-ci ne peuvent être empruntées qu'avec le consentement du Conseil municipal. Une concession délivrée par l'Etat est obligatoire pour les lignes aériennes d'une tension dépassant 250 volts par rapport à la terre et s'étendant hors du domaine de l'exploitant.

En *Norwège* existe le régime des concessions exclusives ; la loi du 23 juillet 1894 donne le droit d'expropriation pour les lignes électriques quand il s'agit d'une entreprise d'intérêt public. La loi du 3 septembre 1909, sur l'acquisition des chutes d'eau, prévoit une reprise par l'Etat et sans remboursement, de tous les ouvrages hydrauliques à l'expiration d'une période de 60 ou 80 ans. On préfère poser les lignes primaires à travers les propriétés privées que le long des routes.

En *Russie*, au *Portugal*, en *Roumanie*, les municipalités

Digitized by Google

peuvent délivrer des concessions exclusives ; aucune législation spéciale n'existe dans ces pays.

Au *Japon*, la loi du 29 mars 1911 impose une autorisation ministérielle pour toutes les distributions d'électricité à l'usage public. Cette autorisation confère à l'exploitant le droit de passage sur les voies publiques et les terrains privés. Les tarifs maxima peuvent être fixés par le ministre compétent si l'intérêt public le demande.

Dans la *République Argentine* les concessions exclusives ne sont pas admises. Elles seraient contraires à la Constitution qui défend, dans un article spécial, la création de monopoles. Il n'est pas fait de distinction entre l'électricité destinée à l'éclairage et l'électricité destinée à la force motrice. L'expropriation des propriétés privées ne peut pas se faire légalement, mais on s'arrange assez aisément avec les particuliers, même pour les transports d'énergie d'intérêt privé.

Au *Canada*, les concessions exclusives ne se délivrent que très rarement. Il faut pour cela un vote des contribuables de la municipalité. A Montréal, plusieurs sociétés sont en concurrence. Le droit d'expropriation peut être obtenu si ce droit est conféré par le Parlement dans l'acte d'incorporation la la Société. Généralement les lignes primaires sont installées le long des lignes de chemins de fer, ou sur un terrain privé avec permission des propriétaires ou sur une lisière de terrain achetée pour cette fin.

Il existe en la province d'Ontario (Canada) un curieux état de choses. Le Gouvernement provincial achète l'énergie électrique en grande quantité, la transmet pour toute la province par lignes aériennes à haute tension, et la livre aux municipalités, encourageant et aidant celles-ci à établir une distribution locale, dans presque tous les cas, en concurrence directe et libre avec une société exis-

Digitized by Google

tante. Cette concurrence existe dans plusieurs villes de ce pays. Le système est pernicieux. En quelques cas les prix ont été réduits au consommateur, mais l'entreprise privée a souffert. Le capital a été découragé et la Province s'est fait une dette énorme. A Toronto, capitale de l'Ontario, la municipalité, en concurrence avec une société, a fait une perte, pour l'année 1911, de 950,000 frs.

Messieurs, je ne vous ai pas encore parlé de la *Hollande*, c'est intentionnellement que je termine par ce pays qui présente au point de vue administratif bien des ressemblances avec le nôtre, tout d'abord parce qu'il n'y a que quelques semaines qu'un projet de loi sur les distributions d'énergie électrique a été soumis à la 2me Chambre des Etats Généraux et ensuite parce que ce projet est entièrement original et ne ressemble en rien aux autres systèmes de législation étudiés. Il mérite à ce titre de captiver votre attention d'une façon spéciale.

Aussi longtemps que le Gouvernement hollandais n'a pas vu la voirie de l'Etat s'encombrer de canalisations électriques, il se préoccupa peu de légiférer au sujet des distributions d'électricité, mais bientôt, les demandes d'emprunt de cette voirie pour la pose de canalisations électriques se multiplièrent au point d'aboutir, dans certains cas, à des impossibilités. Le Gouvernement, par la suite, s'est vu obligé de ne donner satisfaction, au point de vue de l'emprunt de la voirie de l'Etat, qu'aux seuls impétrants pouvant exciper d'un intérêt général. L'exposé des motifs qui accompagne le projet de loi s'exprime en ces termes à ce sujet :

« Même dans le cas où une seule demande d'emprunt » de la voirie se produit, il se peut qu'il ne soit pas recom- » mandable de l'accueillir ; il importe, en effet, de prévoir » que d'autres demandes suivront à bref délai et que, » lorsque le législateur sera intervenu pour régler la

Digitized by Google

» matière, il faudra réserver l'usage de la voirie aux entre-
» prises embrassant une région entière et présentant un
» caractère d'intérêt général plus accusé que les petites
» centrales en instance d'autorisation.

» C'est ainsi que si l'on suppose le cas où une dépen-
» dance de la voirie ne peut s'accommoder que de l'éta-
» blissement d'un seul câble, il va de soi que ce n'est pas
» la priorité d'une demande d'installation sur une autre
» qui peut être déterminante de l'accueil à lui réserver,
» mais bien l'utilité du réseau dont ce câble forme l'un
» des éléments. Dans le même ordre d'idées, si des ins-
» tallations d'une utilité secondaire ont obtenu l'autorisa-
» tion de s'établir sur le domaine public, il pourra se faire
» que cette autorisation doive être rapportée, ce qui mettra
» l'entrepreneur évincé dans une situation beaucoup plus
» désavantageuse que si, dès le principe, l'autorisation
» lui avait été refusée. »

Voici quelles sont les dispositions essentielles du projet de loi ; tout d'abord il est stipulé :

« Pour l'établissement et l'exploitation, par tout autre
» que l'Etat, d'installations et d'ouvrages affectés à la pro-
» duction, au transport, à la transformation de la distribu-
» tion et de la fourniture de l'électricité, une concession
» délivrée par l'Etat est exigée, si l'électricité doit être
» mise à la disposition des tiers. »

Plus loin :

« La concession est accordée sans limitation de temps
» et elle peut être retirée par l'Etat à toute époque après
» avoir été dénoncée deux ans à l'avance et, dans ce cas,
» les installations, ouvrages et tout ce qui leur est connexe,
» s'ils ont été établis ou aménagés avec l'approbation ou
» à l'intervention des Ministres, seront acquis par l'Etat
» contre remboursement des dépenses afférentes à l'éta-
» blissement, à l'appropriation, à l'amélioration, aux

Digitized by Google

» modifications et extensions qui auront été approuvées
» par ces Ministres, sous réserve des réductions pour
» dépréciations, conformément aux stipulations de l'acte
» de concession ; étant entendu que, si la dépossession a
» lieu endéans les vingt années de l'entrée en vigueur de
» la concession, le montant de l'indemnité calculée comme
» il a été indiqué ci-dessus subira une augmentation
» d'après un pourcentage fixé dans cet acte pour chaque
» année entière restant à courir jusqu'au terme de vingt
» ans. »

Evidemment l'Etat hollandais n'entend pas se substituer simplement aux communes pour accorder des concessions. Nous n'en voulons pour preuve, que le passage suivant de l'exposé des motifs :

« L'octroi d'une concession fournit à celui qui la délivre
» l'occasion de poser dans chaque cas les conditions d'un
» juste départ entre les intérêts de la communauté et ceux
» de l'entrepreneur. C'est au Gouvernement qu'incombe
» la tâche importante de délimiter la zone sur laquelle la
» concession s'étendra. Puisque le but visé par le projet
» de loi est de faire profiter le pays entier des avantages
» inhérents à la mise à sa disposition de l'énergie élec-
» trique, l'objectif du Gouvernement devra être d'éviter
» autant que possible que la détermination des zones con-
» cédées ne conduise à l'isolement de certaines régions
» qui se trouveraient ainsi dans l'impossibilité de se pro-
» curer l'énergie électrique à un prix raisonnable et
» perdraient les sources de prospérité économique qui y
» sont attachées. Il ne s'agit nullement, il est à peine
» besoin de le dire, d'appliquer ces dispositions de ma-
» nière à contraindre les concessionnaires à canaliser,
» dès le principe, toute l'étendue de leur concession ou
» d'exiger d'eux qu'ils appliquent le même régime en
» matière de raccordement et de fourniture de courant

Digitized by Google

» sur toute cette étendue. Mais on exigera des conces-
» sionnaires que leurs projets soient établis en ayant
» égard aux besoins de toute la zone concédée. Pour le
» surplus le Gouvernement fixera la partie de cette zone
» qui devra être desservie dans un délai déterminé, sans
» qu'il faille nécessairement pour celà que le service finan-
» cier des capitaux à investir soit immédiatement assuré.
» On imposera, d'autre part, aux concessionnaires l'obli-
» gation de pourvoir par la suite à toute extension du
» réseau à laquelle s'attachera la garantie que les recettes
» couvriront les frais d'entretien, d'amortissement et
» d'intérêts afférents aux travaux que cette extension
» comporte. »

Nous voyons dans le projet de loi hollandais l'ingérence de l'Etat dans les distributions d'électricité poussée à un degré maximum. Si la loi est votée, une lourde responsabilité pèsera sur le Gouvernement hollandais, car il dépendra de la façon dont il interprétera le rôle qu'il s'est attribué de décourager ou d'encourager l'initiative privée en matière de distribution d'énergie électrique. Dans le premier cas il devrait se confier entièrement aux exploitations des régies provinciales constituées par l'association des diverses communes intéressées; dès maintenant une telle tendance s'affirme dans les provinces de Frise et du Nord Brabant. Il semble qu'il y ait là un écueil sérieux à redouter, non pas que la compétence nécessaire ne puisse être accordée à de telles organisations pour mener à bien une entreprise de distribution, mais parce que les régies provinciales seront à coup sûr plus administratives — dans le mauvais sens du mot — que des organisations dues à l'initiative privée qui resteront toujours plus souples et plus adaptables aux contingences locales.

Digitized by Google

* * *

En *Belgique*, Messieurs, force nous est de constater qu'il n'existe rien en fait de législation et de réglementation relatives au sujet qui nous occupe, si nous faisons exception, d'une part, pour un règlement émanant du Ministère de l'Industrie et du Travail, relatif aux exploitations électriques dans les mines qui répète les prescriptions étudiées par l'Association des électriciens allemands, et celui que prépare, depuis de longs mois, sous les auspices du Ministère des Chemins de fer, un Comité consultatif des Mesures de Sécurité ; ce dernier règlement étant destiné à fixer les conditions d'installation de canalisations électriques sur la voirie de l'Etat. Cependant, si officiellement aucune loi ni règlement n'a été promulgé, il ne faudrait pas en conclure que l'on soit resté totalement inactif. Voici par ordre de date les différents documents officiels relatifs à l'électricité qui ont paru en Belgique :

le 30 octobre 1903, une loi définissait les unités électriques légalement valables en Belgique ;

le 28 décembre 1903, un arrêté royal a institué auprès du Ministère de l'Industrie et du Travail une Commission chargée d'établir des étalons pratiques conformes au système légal des unités d'électricité et de donner son avis quant aux limites des écarts à tolérer dans l'exactitude des instruments des mesures des grandeurs électriques employés dans les transactions ;

le 8 mars 1906, un arrêté royal a institué auprès du Département de l'Industrie et du Travail une nouvelle Commission dont le rôle était défini comme suit :

Cette Commission a un caractère purement consultatif, elle délibérera sur les questions qui lui sont soumises par le Ministère de l'Industrie et du Travail et qui concernent

Digitized by Google

l'industrie électrique, le fonctionnement du laboratoire d'étalonnages électriques de l'Etat, l'approbation des types d'appareils de tarification de l'énergie électrique.

Cette dernière Commission était de composition identique à la première. Elle comprenait 14 membres : 4 professeurs, 1 industriel, 1 représentant des régies et 8 fonctionnaires représentant les grandes administrations.

Le 14 novembre 1906, M. le baron M. van der Bruggen lança une lettre aux divers gouverneurs des provinces dont le contenu intéressait au plus haut point l'industrie électrique. Cette lettre informait ces hauts fonctionnaires qu'en prévision des dispositions d'une loi alors à l'étude, il serait possible d'atténuer les inconvénients résultant du fait que les concessions habituellement délivrées par les communes les engagent pour une durée considérable, en faisant connaître, dès ce moment, aux administrations intéressées, les principes fondamentaux qui président à l'étude du projet en élaboration et qui seront, suivant toutes les prévisions, ceux de la législation nouvelle. Ces principes étaient condensés dans une note qu'on peut résumer ainsi :

Les communes peuvent accorder des concessions exclusives pour l'éclairage, maïs ne peuvent accorder de semblables concessions pour les distributions d'électricité destinées à la force motrice et autres usages industriels.

En 1907, la Commission dont nous avons parlé rédigea un rapport et un avant-projet de loi sur les distributions d'énergie électrique. Cet avant-projet portait pour dispositions principales celles qui viennent d'être énoncées. Il souleva des protestations véhémentes de la part des administrations communales, des petits industriels et même d'une ou de deux grandes sociétés de distribution qui craignaient de voir s'établir des concurrents. Le

Digitized by Google

projet de loi ne fut pas soumis aux Chambres législatives.

Le 31 mai 1912, M. Van de Vyvere, alors Ministre de l'Agriculture et des Travaux publics, a pris un arrêté extrêmement intéressant. Les communes de l'agglomération bruxelloise ont reçu, par cet arrêté, délégation pour accorder, au nom du Département de l'Agriculture et des Travaux Publics, les autorisations sollicitées pour pratiquer dans la grande voirie de l'Etat les tranchées nécessaires au raccordement des riverains de la voirie, à toutes les canalisations autorisées par l'Etat dans sa voirie, même aux câbles électriques.

C'est toujours l'Etat qui se réserve, bien entendu, le droit de donner l'autorisation pour la pose longitudinale de câbles.

En vertu de l'article 7 de cet arrêté ministériel, le Ministre statue, en dernier ressort, sur les décisions d'une administration communale qui comporteraient un refus d'autorisation.

En résumé, cet arrêté méritait d'être signalé parce que l'Etat affirme son droit d'accorder à un riverain de la grande voirie une autorisation de se raccorder aux câbles qui y sont installés et son intention de transformer, en champ de libre concurrence, la voirie de l'Etat et les parties des villes qui peuvent être atteintes par la grande voirie sans emprunter la voirie communale.

Enfin, le 15 février 1913, le Ministre de l'Industrie et du Travail a constitué une Commission chargée de donner son avis sur les dispositions d'un avant-projet de loi sur les distributions et concessions d'énergie électrique empruntant la voie publique. Cette Commission, dont j'ai eu l'honneur de faire partie, a été composée à l'instar de ce qui se fait en France, pour le Comité d'Electricité, d'un nombre égal de fonctionnaires de différents départements ministériels et de représentants des entreprises de distribution d'électricité.

Digitized by Google

La Commission a terminé ses travaux ; il serait prématuré actuellement d'en indiquer les tendances autrement que pour dire que sous la présidence pleine de tact et très éclairée de M. Eric Gerard et, grâce à la bonne volonté des membres de la Commission, il a été possible de concilier bien des intérêts opposés et de tenir compte de la grande majorité des revendications.

Voici donc où nous en sommes; vous savez, Messieurs, que malgré l'absence de législation, une grande partie des habitations de la Belgique peuvent être raccordées à des réseaux d'électricité. Des communes puissantes: Bruxelles, Gand, Liége, Ixelles, Saint-Gilles ont établi des régies communales. Des distributions régionales dues à l'initiative privée et s'étendant sur de vastes territoires alimentent un très grand nombre de communes. Je suis en mesure de vous donner au sujet de ces dernières exploitations quelques renseignements statistiques qui vous feront saisir le développement qu'elles ont pris dans ces dernières années :

	1903	1912
Puissance installée en kilowatts	3,300	117,000
Population desservie	382,000	1,806,000
Capitaux engagés en millions de francs . .	14,5	89,1
Etendue des réseaux primaires aériens en kilomètres	84	364
Etendue des réseaux primaires souterrains en kilomètres	0	919
Etendue des réseaux secondaires aériens en kilomètres	17	1,812
Etendue des réseaux secondaires souterrains en kilomètres	105	691

On remarquera que de pareils résultats font la preuve qu'en Belgique tout est pour le mieux dans le meilleur des mondes. Non, Messieurs, ce n'est pas une raison parce que l'industrie dont nous nous occupons se soit

Digitized by Google

développée sans protection jusqu'à présent qu'il faille laisser perdurer un état de choses qui menace d'entraver d'une manière de plus en plus grave son développement ultérieur.

Laissez-moi vous exposer d'une façon un peu pessimiste, il est vrai, la situation qui est faite en Belgique à l'exploitant d'un réseau ; ce sera la meilleure préparation à l'étude des divers points qu'une nouvelle législation doit rencontrer.

A peine installé dans ses fonctions de directeur d'une entreprise d'électricité, Monsieur X... cherche à diminuer les frais d'exploitation et à cette fin examine chaque poste de dépenses. Il s'effraie de voir l'importance des frais de remplacement des isolateurs brisés par les ardeurs sportives — les sports deviennent de plus en plus à la mode — de jeunes gens de mauvaises familles. Il constate également que la plupart des dérangements aux installations et des interruptions dans la distribution proviennent de ressorts de lits détordus, de fils de fer, de ronces artificielles, etc. que les dits jeunes gens jettent sur les lignes aériennes, mûs, sans doute par le désir de nettoyer la voirie et celui de s'instruire sur la couleur et le bruit des étincelles provoquées par les court-circuits.

Monsieur X... arrive un jour, après des ruses et des démarches nombreuses, à faire dresser procès-verbal à l'un des auteurs de ces attentats au bon fonctionnement de ses installations. Il se croit sauvé par l'exemple que constituera la condamnation du coupable ; il constate que le procès-verbal reste sans suite ; il s'enquiert et apprend que le fait de déranger, même volontairement, le bon fonctionnement de lignes électriques d'intérêt industriel et même d'intérêt public ne constitue pas en Belgique un délit punissable d'une peine correctionnelle, mais qu'heureusement, il lui reste toujours la ressource d'intenter

Digitized by Google

contre le coupable une action civile en dommages et intérêts, ce à quoi il renonce évidemment puisque les coupables n'ont jamais de quoi payer un sou d'amende.

Les attentats se renouvelant sans cesse, Monsieur X... estime cependant que des procès-verbaux auraient un effet salutaire sur la conduite de ces jeunes gens. Comme les gardes-champêtres ont, en général, peu de temps disponible, il croit avoir trouvé la solution en demandant l'assermentation de plusieurs de ses agents afin de les autoriser à dresser des procès-verbaux. Il lui est répondu que l'assermentation de gardes particuliers ne peut être accordée que pour la surveillance des propriétés rurales et non pour la surveillance des lignes électriques.

A quelques mètres en dehors de la limite du territoire sur lequel Monsieur X... possède une concession se trouve un établissement industriel en difficulté avec une régie communale exploitant un réseau de distribution d'électricité. L'industriel demande à se raccorder au réseau communal ; le Conseil communal refuse, alléguant le motif que ses installations n'ont pas la puissance nécessaire à l'alimentation de l'industriel ; Monsieur X... demande en haut lieu de pouvoir, dans ces conditions, alimenter l'industriel ; on lui répond que les droits de la commune doivent lui enlever tout espoir d'alimenter le dit client.

Ne pouvant s'étendre de ce côté, Monsieur X... acquiert de nouvelles concessions ; pour les desservir, il demande les permissions de voirie nécessaires aux communes, à la province et à l'Etat. Quelques communes lui refusent catégoriquement le passage ; établissant un tracé détourné, il obtient l'autorisation de passage dans d'autres communes moyennant le paiement de taxes presque toujours fantaisistes et hors de proportion avec le dommage ou la sujétion qu'entraîne le passage des canalisations. La province finit par lui accorder, après de longues

Digitized by Google

semaines, l'autorisation sollicitée ; l'Etat, enfin, après plusieurs mois lui accorde l'autorisation d'emprunter sa voirie. L'installation à peine en marche, une des communes majore la taxe annuelle de passage des canalisations ; l'autre, qui vient d'être le théâtre d'un changement de majorité au Conseil communal, le met en demeure purement et simplement d'avoir à renoncer aux bénéfices de l'autorisation qui lui a été donnée.

Malgré toutes ces difficultés, Monsieur X... cherche à desservir un groupe de concessions situées à plusieurs dizaines de kilomètres de sa centrale. Devant se servir de haute tension et réclamant au Gouvernement l'autorisation de poser des lignes aériennes le long des routes, on lui apprend que son tracé devra s'écarter des routes de l'Etat, à la traversée des villages, et qu'il aura à s'entendre avec les particuliers pour planter ses supports sur les propriétés privées. Il apprend que le droit d'expropriation, pour des lignes électriques d'intérêt public, n'existe pas en Belgique. Bientôt, cependant, grâce à une persévérance louable et à une habileté spéciale qui lui permet de tourner les difficultés que son exploitation soulève chaque jour, il s'apprête à recueillir les fruits de son travail, quand il apprend que, muni d'une autorisation en règle de l'Etat et empruntant la voirie gouvernementale, un industriel métallurgiste ne possédant aucune concession, n'étant astreint à aucune obligation, vient lui enlever ses plus gros clients riverains de la voirie de l'Etat à la faveur de prix qui ne peuvent se justifier qu'en ne comptant pas à leur juste valeur, dans les frais de production, la main-d'œuvre et le combustible !

Alors, désespéré, l'exploitant se demande s'il n'aurait pas intérêt à transporter le siège de son industrie en Patagonie ou à la Terre de feu.

Les dirigeants des régies ont également à se plaindre

Digitized by Google

de la situation actuelle. Tout d'abord ils réclament avec véhémence, sans l'obtenir, le droit très contestable, il est vrai, de fournir l'énergie en dehors du territoire communal. Ils ont la crainte que l'Etat ne transforme la grande voirie en un champ où la libre concurrence s'exerce ; ils se plaignent encore, mais ceci est la conséquence même de leur organisation, de l'influence néfaste que la politique joue dans leurs exploitations. Un des dirigeants d'une régie importante en Belgique me disait dernièrement :

« Que voulez-vous ? Nous ne pourrons jamais exploiter » à des conditions aussi avantageuses que l'industrie » privée. La faute en est à la politique qui nous fait une » obligation d'employer des agents irrévocables, conve- » nant au point de vue politique et qui en général ne » conviennent pas du tout au point de vue pratique. Si » l'on me permettait d'embaucher et de révoquer libre- » ment mon personnel, je diminuerais de moitié le coût » de la main d'œuvre de mon exploitation. »

Après avoir parlé du sort des Sociétés et des régies, il importe de ne pas perdre de vue le principal intéressé : le consommateur.

Le consommateur demande à pouvoir s'alimenter dans des conditions les plus économiques et à trouver un ou plusieurs organismes de distribution suffisamment souples pour se prêter éventuellement à des modifications de tarifs bien adaptables au genre d'industrie qu'ils exercent.

Les médecins bien avisés mettent toujours en pratique la maxime : il n'y a pas de maladies, il n'y a que des malades. Les marchands d'électricité doivent faire de même et traiter tous les clients intéressants en cas spéciaux ; ce qui implique souvent, il ne faut pas se le dissimuler, un examen approfondi, tant de la part des fournisseurs que de celui des clients, des conditions les

Digitized by Google

plus économiques de fourniture. A ce sujet il est reconnu que les entreprises privées ont plus de facilité pour s'adapter aux multiples conditions de fourniture exigées aujourd'hui pour l'alimentation rationnelle d'une clientèle importante.

Il faut enfin dire un mot des intérêts de la masse des habitants d'un pays. A ce point de vue, il est évidemment souhaitable de voir toute la population d'une région ou même d'un pays être desservie à bon compte, être mise à même de jouir des bienfaits de l'électricité. Mais ici nous soulevons un problème économique particulièrement délicat, difficile à résoudre.

Faut-il faire supporter totalement ou partiellement aux parties rémunératrices des réseaux les frais d'exploitation des parties non rémunératrices ?

Faut-il traiter sur le même pied d'égalité les habitants des grands centres rémunérateurs et ceux des petits centres où la clientèle est rare ?

Faut-il enfin mettre les organismes de distribution dans l'obligation de canaliser toute une région ?

Il est certain, Messieurs, que la vérité existe dans la moyenne mesure. Il ne faut pas que le Gouvernement, qui tient en main l'avenir économique de l'ensemble du pays, voie d'un œil indifférent les organismes de distribution se grouper uniquement près des centres rémunérateurs et délaisser de parti-pris les autres centres. Il ne faut pas davantage que, par des mesures draconiennes, il mette à charge de ces organismes des obligations peu compatibles avec le développement normal de l'entreprise. Il ne faut pas non plus que les tarifs forment un ensemble uniforme, rigide et immuable et il convient que les consommateurs placés dans des conditions de fourniture équivalentes ne soient pas traités trop différemment.

Reprenons les termes cités plus haut. *Il faut que l'octroi*

Digitized by Google

d'une concession fournisse à celui qui la délivre l'occasion de poser dans chaque cas les conditions d'un juste départ entre les intérêts de l'entrepreneur et de la communauté, celle-ci s'étendant, bien entendu, au delà des limites du territoire d'une commune.

Je crois avoir énuméré sans parti pris toutes les considérations qui rendent désirable l'existence d'une législation en Belgique. Me résumant, je dirai qu'il faudrait, sous peine de voir compromettre l'essor des réseaux d'électricité :

1° Que l'Etat possédât les pouvoirs nécessaires pour conduire harmonieusement le développement des distributions régionales au mieux des intérêts de l'ensemble des habitants du pays ;

2° Que l'Etat donnât aux distributions régionales des pouvoirs de poser leurs canalisations le long de toutes les voiries et même, si nécessaire, sur les propriétés privées ;

3° Que l'Etat n'autorisât la vente de l'électricité, par des canalisations empruntant la voie publique, que moyennant des concessions et des cahiers de charges complets et ne tolérât, pour la force motrice, la concurrence qu'*à charges* égales ;

4° Qu'il fixât à cette fin définitivement les droits respectifs de l'Etat et des communes sur la grande voirie ;

5° Qu'il mît à jour le Code pénal et le Code rural pour rendre possible la répression des attentats au bon fonctionnement des ouvrages d'électricité et l'assermentation des gardes particuliers.

Vous constaterez, Messieurs, que je me prononce nettement dans ce que je viens d'énoncer en faveur du principe de la concurrence formant la base économique de la loi française et non en faveur du monopole sans concurrence dont fait mention le projet hollandais. Il est juste de reconnaître cependant qu'en matière de distribution

Digitized by Google

d'énergie électrique la concurrence entre organismes distributeurs n'est pas une nécessité comme en matière de transport, d'industrie et de commerce. Les fournisseurs d'électricité trouvent toujours chez le client intéressant leur concurrent ; il n'est pas, en effet, de petits industriels qui n'envisagent la possibilité de « fabriquer eux-mêmes leur électricité » et les conditions difficiles de réussite des entreprises industrielles et commerciales à notre époque rendent ces industriels toujours enclins à se prononcer pour la solution qui entraîne un minimum de dépenses.

Mais, Messieurs, j'estime que la concurrence peut néanmoins être salutaire dans bien des cas ; c'est elle qui est l'aiguillon nécessaire à une exploitation économique et c'est elle qui peut seule donner la certitude au pouvoir concédant que les prix pratiqués ne sont pas exagérés, non seulement au début d'une concession, mais encore pendant toute sa durée. En maints endroits cette concurrence n'existera pas, notamment dans les parties peu rémunératrices; dans d'autres, elle existera et cela suffit, à mon sens, pour faire admettre le principe de la concurrence comme supérieur à celui du monopole et des concessions exclusives. Quand je parle de concurrence, j'entends évidemment une concurrence s'exerçant entre organismes astreints aux mêmes obligations et ne pouvant distribuer qu'à la condition de posséder une concession de vente régulièrement accordée par les corps constitués. Sans cette restriction, en effet, la concurrence peut être néfaste au point de vue de l'intérêt général. L'exemple de ce qui s'est passé dans les dernières années en France est là pour nous instruire des inconvénients et abus qu'entraîne la distribution de l'énergie par de simples permissionnaires de voirie.

Il est assez malaisé d'expliquer pourquoi le législateur

Digitized by Google

belge ne s'est pas encore occupé d'électricité. Il semble cependant qu'une des circonstances motivant cette abstention se trouve dans le fait que trop de départements ministériels se croient obligés de s'occuper de questions d'électricité. Le Ministère des Chemins de fer, pour les mesures de sécurité ; celui des Postes et Télégraphes, pour la protection de leurs lignes ; celui de l'Agriculture et des Travaux Publics, pour la pose des canalisations le long des routes et pour les tramways ; celui de l'Industrie et du Travail, pour les installations industrielles.

Or, vous savez, Messieurs, que lorsque plusieurs organismes ont à s'occuper d'un même sujet, on peut être à peu près certain qu'aucun progrès d'ensemble bien rapide n'est à attendre. Chaque département met un zèle jaloux à veiller à ce que le Département concurrent ne s'empare pas de l'ensemble de la question à traiter. Nous savons qu'en Belgique des discussions vives ont lieu entre les partisans des régies et les partisans d'industries privées, mais il nous revient que des discussions non moins vives se soulèvent quelquefois entre fonctionnaires de départements différents relativement à la ligne de conduite que devrait suivre le Gouvernement. Il suffirait peut-être pour faire cesser cet état de choses, qu'un beau matin, un ministre parvînt à convaincre ses collègues de la nécessité de domicilier la question dans un certain département et de mettre fin à ces rivalités inopportunes. On verrait peut-être alors la question faire un pas en avant et aboutir à la rédaction d'un projet de loi représentant les idées du Gouvernement tout entier.

Mais Messieurs, il resterait, pour arriver à la promulgation d'une loi, une grande difficulté à surmonter ; celle de convaincre les membres du Parlement que la question intéresse bien plus l'avenir et la prospérité du pays tout entier que celui des régies communales ou des sociétés privées.

Digitized by Google

Si l'on n'y prend garde la discussion d'un projet de loi dégénérerait immédiatement en une levée de boucliers contre les « menées » des capitalistes et des trusts pour protéger les régies communales.

Après tout, les intéressés ont le droit de se défendre et d'empêcher qu'on les étrangle, mais il conviendrait qu'ils consentissent à envisager l'ensemble de la question non pas de leur point de vue, mais à la lumière des intérêts supérieurs dont dépend l'avenir économique de notre pays.

Digitized by Google

BIBLIOGRAPHIE.

537.53(048) **Passage de l'Électricité à travers les gaz**, par J.-J. THOMSON, professeur de physique expérimentale à l'Université de Cambridge et professeur de philosophie naturelle à la Royale Institution de Londres ; traduction française, d'après la 2de édition anglaise, par R. FRIC et A. FAURE. — Paris, Gauthier-Villars, 1912.

On sait quelle large part le professeur J.-J. Thomson a prise à l'édification des théories modernes de l'électricité et combien profonde est sa foi en la doctrine corpusculaire ; c'est lui, en effet, qui, le premier, osa émettre cette affirmation qu' « en fait, le fluide électrique nous est actuellement mieux connu que d'autres fluides, tels que l'air et l'eau. »

Son grand travail sur les phénomènes électriques dont les gaz sont le siège s'inspire entièrement de la théorie électronique et tend d'ailleurs à la fortifier.

Bien que les effets lumineux et chimiques de l'arc électrique et des autres modes de décharge dans les gaz aient reçu à ce jour de nombreuses et importantes applications, les matières traitées dans l'ouvrage du professeur Thomson attireront plutôt l'attention des physiciens que des techniciens.

Comme le fait observer l'auteur, l'intérêt de l'étude des phénomènes de ce genre réside principalement dans la lumière qu'elle cherche à projeter sur une foule de faits encore mal connus : relations entre le fluide électrique et la matière, nature intime de l'électricité, structure

Digitized by Google

élémentaire de la matière, processus des phénomènes de radiation, de luminosité, de conductibilité et des actions chimiques.

Le gros traité de J.-J. Thomson, — qui compte à peu près 700 pages et plus de 200 figures, — présente un tableau d'ensemble de tout ce qui a été conquis ou entrevu jusqu'à ce jour dans ce vaste domaine. Pour donner une idée de la diversité des matières se rattachant au sujet en question, signalons les chapitres essentiels de l'ouvrage considéré : nous aurons à citer notamment ceux qui traitent de la conductibilité des gaz à l'état normal et à l'état ionisé, y compris la théorie mathématique de l'ionisation, de la détermination du rapport de la charge électrique à la masse d'un ion, des phénomènes de condensation de brouillard par les ions gazeux et des cas spéciaux d'ionisation (par les corps incandescents, les flammes, les actions chimiques, la lumière, les rayons de Röntgen, les corps radioactifs) ; disons enfin que la décharge disruptive, l'arc électrique, les décharges dans les gaz raréfiés, les rayons cathodiques et les rayons X sont étudiés d'une manière approfondie, tant au point de vue analytique qu'au point de vue expérimental. C. VERLINDEN.

654.6(048) **Propagation des courants électriques dans les conducteurs téléphoniques et télégraphiques**, par J.-A. FLEMING. — Traduction par C. RAVUT, ingénieur des Postes et Télégraphes, Paris. — Gauthier-Villars, 1913. (Bibliothèque des Annales des Postes, Télégraphes et Téléphones.)

La télégraphie et la téléphonie, bien que limitées dans le domaine du courant « faible », ont depuis l'origine puissamment contribué à l'avancement général de la science et de la technique de l'électricité.

Digitized by Google

Ce qui se présenta pour les débuts de la télégraphie avec fil et de la télégraphie sous-marine qui entraînèrent d'innombrables travaux et notamment l'établissement de notre système d'unités, advint à nouveau pour la télégraphie sans fil. De même l'analyse de la propagation des courants téléphoniques le long des conducteurs provoque depuis plusieurs années un mouvement scientifique intense et une orientation nouvelle de la technique et ces progrès commencent déjà à avoir leur répercussion dans le domaine du courant « fort. »

C'est ce nouveau courant d'idées et de faits qui est largement exposé dans l'ouvrage de M. Fleming. L'auteur a traité la question avec une clarté remarquable et bien que le sujet soit développé d'une manière approfondie et complète, la lecture de l'ouvrage est très aisée.

On sait que les problèmes qui se posent dans cette branche de la technique téléphonique sont particulièrement complexes. Ils auraient normalement conduit à des développements mathématiques ardus et étendus si des méthodes spéciales de calcul particulièrement adaptées aux données et au caractère des questions à analyser n'avaient pu être utilisées. De même que les notations de Steinmetz ont considérablement simplifié l'étude des courants alternatifs et que le calcul vectoriel a notablement facilité l'analyse du champ électromagnétique dans la théorie des électrons, de même ici les fonctions exponentielles ou plutôt les lignes hyperboliques sont d'un très grand secours en simplifiant les notations et les calculs et en éclaircissant l'étude des divers phénomènes.

Pour faciliter le travail du lecteur et pour éviter que l'étude de l'ouvrage ne doive être subordonnée à des connaissances mathématiques spéciales, l'auteur donne d'abord dans une introduction mathématique un exposé très suggestif de la trigonométrie hyperbolique en y insé-

Digitized by Google

rant même en appendice des tables des diverses lignes hyperboliques tant pour des valeurs réelles que pour des valeurs complexes des arguments. De même, dans le chapitre II, il développe les fondements de la théorie de la propagation des ondes électromagnétiques le long des fils.

Consacrant ensuite le chapitre III à l'étude préalable de la propagation des courants simplement sinusoïdaux dans le cas général d'une ligne présentant à la fois de la résistance, de la self, de la capacité et des pertes, il entre enfin dans le cœur du sujet aux chapitres IV et V, traitant de la propagation des courants téléphoniques dans les câbles et de la télégraphie sous-marine. Une large place est d'abord faite à l'examen de la nature des courants téléphoniques, à leur analyse suivant la série de Fourier, mais c'est évidemment la pupinisation qui fait l'objet principal du premier de ces chapitres. On y trouve notamment, après un aperçu historique très intéressant, la théorie de Pupin pour les câbles ordinaires et pour les câbles chargés de bobines de self, la théorie de Campbell du câble pupinisé, ainsi que l'étude du câble proposé dès les débuts par S. P. Thompson et armé de bobine de self en dérivation et non en série dans le circuit.

Après un chapitre consacré aux oscillations à haute fréquence dans un circuit rayonnant avec description d'expériences démonstratives des ondes stationnaires, la fin du volume traite des mesures expérimentales des diverses constantes des câbles, de leur prédétermination théorique par le calcul et des récents progrès réalisés dans la technique de la pupinisation et des câbles à self uniformément répartie.

On y trouve, en dehors de nombreuses données numériques précieuses, des renseignements intéressants sur divers dispositifs, notamment sur l'influence favorable

Digitized by Google

d'une pupinisation décroissante à l'extrémité des câbles (taper terminal) au point de vue de la réduction des effets de réflexion.

L'ouvrage de M. Fleming rendra de grands services aux ingénieurs télégraphistes et téléphonistes et ceux-ci lui sauront gré non seulement d'avoir exposé son sujet avec tant de clarté et de précision, mais surtout d'avoir accumulé au cours de son sujet tant de renseignements techniques et de données numériques.

Les ingénieurs savent de quel précieux secours ces données peuvent être, combien elles sont parfois difficiles à établir ou à rechercher, et ils apprécieront hautement cet ouvrage où l'auteur parle non seulement en homme de science éminent, mais aussi en praticien consommé.

P. DRUMAUX.

621.339.048) **Les sécurités électriques appliquées aux installations de signalisation à manœuvre manuelle**, par G. YSEBOODT, ingénieur des chemins de fer de l'État belge ; H Dunod et E. Pinat, Paris 1913.

Par suite de l'augmentation incessante du trafic, les administrations de chemins de fer se voient obligées d'agrandir continuellement la plupart des stations et par conséquent d'étendre le rayon d'action des cabines de signalisation.

D'autre part, la vitesse toujours croissante des trains oblige les exploitants à veiller avec un soin de plus en plus minutieux au fonctionnement des appareils de voie et des signaux. L'établissement de nouvelles signalisations perfectionnées, la transformation et l'amélioration des signalisations existantes, souvent rudimentaires, sont donc des questions à l'ordre du jour.

L'administration des chemins de fer de l'État belge exploite, dans un pays industriel très riche, d'une étendue

Digitized by Google

relativement minime, un vaste réseau d'environ 6,500 kilomètres de voies principales de circulation, avec de nombreuses stations d'un développement considérable.

L'État belge n'a reculé devant aucun sacrifice pour doter son réseau des installations les plus perfectionnées, en vue d'augmenter la sécurité de la circulation et la vitesse de ses trains dont un grand nombre assurent des services internationaux.

Dans l'ouvrage de M. Yseboodt tous les techniciens liront avec le plus grand intérêt les solutions qui ont été données en Belgique aux problèmes les plus divers qui se sont posés en matière de signalisation en ces dernières années.

Après un exposé de la question, M. Yseboodt traite en détail les *pédales* ; les *enclenchements de fin d'itinéraire, simples* et *en cascade* ; les *détecteurs*, contrôleurs impératifs de la position des aiguilles et des verrous de calage ; les *rails isolés, lattes de calage* électriques ; les *désengageurs électriques* utilisés comme *slots électriques* ou pour la *remise à l'arrêt automatique des signaux* ; les *déclencheurs* actionnés par les chefs de station pour le garage des trains par rebroussement ; les *circuits de voie* ; les *annonces automatiques* des trains ; l'étude d'installations de sécurité et de leurs circuits électriques dans un grand nombre d'applications pratiques.

L'étude de M. Yseboodt contient de nombreux dessins et schémas de lecture facile.

654.25(048) **La Télégraphie sans fil, la Télémécanique et la Téléphonie sans fil à la portée de tout le monde,** par E. Monier, ingénieur des Arts et Manufactures ; préface du Dr E. Branly, membre de l'Institut. 7e édition, revue et augmentée H. Dunod et E. Pinat, Paris, 1913.

Dans cette nouvelle édition, qui a reçu de nombreuses

Digitized by Google

additions, l'auteur fait connaître les découvertes les plus récentes, telles que les étincelles musicales, la direction des ondes, les phares hertziens, etc., etc...

Ces phares, établis sur le littoral, envoient des signaux distincts pour chacun d'eux. Indifférents aux brumes les plus épaisses, ces signaux parviennent aux navires errants dans les brouillards des Océans, et au moyen d'un appareil, *le radiocompas Bellini-Tosi*, ils connaissent leur direction et peuvent naviguer comme par un temps clair, tandis qu'en pareilles circonstances, les phares ordinaires ne donnent aucune indication.

L'auteur fait la description complète des étincelles musicales, cette belle découverte qui permet de transmettre des dépêches dans les déserts surchauffés de l'Afrique, où elles n'avaient jamais pu pénétrer. De la Tour Eiffel, on pourra ainsi envoyer des messages à Tombouctou, et même y faire entendre un petit air de musique.

Un chapitre spécial est consacré à la station définitive de la Tour Eiffel, qui est devenue la plus puissante du monde, grâce à la hauteur incomparable de ses antennes et à la bonne disposition de ses appareils. Mais ce qui fait surtout le plus grand honneur aux ingénieurs et aux officiers qui se sont occupés de cette installation, c'est que le Congrès international de l'Heure, tenu à Paris en 1912, a donné à ce poste la mission de transmettre les signaux horaires aux différentes stations de T. S. F., signaux qu'ils propagent à leur tour dans leur zone d'action. C'est ainsi que tous les navires dispersés sur la surface des mers reçoivent, deux fois par jour, l'heure du premier méridien. Ils recevront également, par le même moyen, les bulletins météorologiques, et des avis sur les dangers qui les menacent sous forme de tempêtes.

Enfin, après la Télégraphie, la Télémécanique et la

Digitized by Google

Téléphonie, toujours sans fil, nous aurons sans doute la Télévision. L'auteur nous en expose le principe et il ajoute : « Les ondes électriques, qui déjà nous font parvenir distinctement les paroles d'une personnes éloignée, nous transmettront en même temps son image, et nous pourrons répondre : je vous comprends très bien, j'entends votre rire et enfin je vous vois ».

Si l'on considère toutes les découvertes merveilleuses décrites dans ce livre et les progrès qui se sont réalisés en si peu de temps, on peut dire que plus rien n'est impossible.

Digitized by Google

SÉANCE DU 15 JUIN 1913.

M. H. Chauvin, *président,* au fauteuil.

Ont signé la liste de présence : MM. Allard ; Biske ; Chauvin ; Creplet ; De Bast ; Defize ; Delsemme ; De Schepper ; Duculot ; Dupont, F. ; Duquesne ; Forgeur ; Galvanowski ; Gosseries ; Greiner, L. ; Grottendieck ; Hennart ; Henrion ; Kogan ; Küntziger ; Leroy ; L'Hoest, L. ; Libert ; Masson ; Mazourine ; Nollet ; Saroukhan ; Theunissen ; Uytborck ; Villers ; Watelet ; Werszwowski ; Zlatine.

Notre camarade **M. E. Uytborck** prend la parole pour développer sa communication intitulée : *Une législation en matière de distribution d'énergie électrique est-elle désirable en Belgique ?* (1).

M. H. Chauvin se fait l'interprète de l'assemblée en remerciant l'orateur dont la conférence, remarquable par la clarté de l'exposé et la précision de la documentation, a été très applaudie.

La séance est levée à 12 1/2 heures.

(1) Le texte de la conférence de M. E. Uytborck a été publié dans le fascicule 5 de la présente année du *Bulletin* (p. 212, tome XIII, 1913).

Digitized by Google

MÉMOIRES.

621.313.031.9 Les essais commerciaux des moteurs d'induction triphasés.

Notre expérience du calcul et des essais de moteurs d'induction triphasés nous a convaincu de la nécessité qu'il y aurait d'adopter une méthode unique pour déduire les caractéristiques de ces moteurs, afin de réaliser une entente satisfaisante entre l'acheteur et le fabricant.

Le fabricant, en donnant des garanties de performance de ses machines, n'utilise pas toujours la même méthode de calcul que le client utilise pour les essais, et ce dernier, lorsqu'il passe la commande, a quelquefois à faire le choix d'une machine sur la base d'offres de diverses maisons, contenant des chiffres qui, par la diversité des méthodes employées, ne sont pas comparables les uns avec les autres.

C'est particulièrement les différentes méthodes de déterminer le facteur de puissance et le rendement, que nous désirons passer en revue. Nous avons réuni à cet effet une quantité considérable de matériaux et essayerons par la suite de montrer que les performances d'un moteur donné, déduites des mêmes résultats d'essais, peuvent différer considérablement suivant la méthode employée pour déduire les caractéristiques du moteur.

Cet état de choses regrettable en lui-même pourrait être évité si une méthode normale d'essais et de calcul

Digitized by Google

était admise par tout le monde. Il serait donc désirable qu'une Commission pût donner une sanction à cette proposition. La Commission se trouverait certainement en présence d'une grande difficulté pour choisir la méthode donnant le plus de garanties d'exactitude, quoique le choix de la méthode en lui-même soit d'importance secondaire, l'important étant de sortir de l'état de confusion par l'adoption d'une seule méthode, car ce sont surtout les valeurs relatives et non les valeurs absolues des chiffres garantis par divers fabricants qui intéressent l'acheteur.

Il peut être amené à choisir une machine plus chère à cause de sa meilleure performance et, de ce chef, il importe, pour qu'il y ait concurrence loyale, que la maison qui obtienne la commande la doive à la meilleure qualité de son fabricat et non au fait que la méthode employée pour obtenir les caractéristiques place son moteur sous un jour plus favorable que ceux des concurrents.

Notre but est de décrire des méthodes d'essais et de calcul qui sont utilisées par diverses maisons de premier ordre et de donner une idée de la variété des résultats qui peuvent être obtenus pour un même moteur selon la méthode adoptée.

* * *

Les quantités qui doivent être déterminées pour obtenir les courbes caractéristiques d'un moteur d'induction sont: la résistance, la réactance, le courant magnétisant, la perte à vide, le courant en charge, le glissement, la puissance absorbée et la puissance réelle. Il n'est pas nécessaire de mesurer toutes ces quantités, car les relations qui existent entre elles permettent d'en déduire quelques-unes par calcul quand les autres ont été mesurées. Il est

Digitized by Google

très facile de voir qu'un grand nombre de méthodes sont possibles suivant le choix que l'on fait des quantités à mesurer, de la méthode employée pour les mesurer et de la manière suivant laquelle les autres quantités sont obtenues par calcul.

Avant de procéder à la description des diverses méthode d'essais, il est nécessaire de mentionner la différence qui existe entre les déterminations des valeurs du facteur de puissance, de la résistance et de la réactance, quelle que soit par la suite la méthode de déduction des caractéristiques qui est adoptée.

Facteur de puissance.

Nous avons rencontré trois méthodes pour déterminer cette quantité, en plus des méthodes dites de Heyland et de Steinmetz, qui sont traitées plus loin *in extenso*.

I. La puissance absorbée est mesurée par la méthode des deux wattmètres. Si l'on suppose la puissance absorbée égale à W watts, le voltage entre deux fils V et le courant dans la ligne C ampères, le facteur de puissance est donné par l'expression

$$\frac{W}{\sqrt{3}\,V\,C}.$$

II. La puissance absorbée est mesurée par la méthode des deux wattmètres. Les deux lectures sont w_1 et w_2. Le facteur de puissance est exprimé par

$$\frac{1+y}{2\sqrt{1-y+y^2}}$$

dans laquelle $y = \frac{w_1}{w_2}$.

III. Le courant magnétisant C_m et la réactance x du

Digitized by Google

moteur sont mesurés et leurs valeurs introduites dans l'expression obtenue par le diagramme des vecteurs (figure 3).

Si l'on admet qu'approximativement e est égal à V dans l'équation indiquée,

$$\cos\varphi = \sqrt{1 - \left(\frac{C_x}{V} + \frac{C_m}{C}\right)^2};$$

c'est-à-dire que le facteur de puissance est égal à $\sqrt{1 - (\text{pourcentage de la chute de tension inductive} + \text{pourcentage du courant magnétisant})^2}$.

Lorsqu'on emploie la méthode des deux wattmètres, il faut se rappeler que si l'on emploie le montage rappelé à la figure 1, la puissance absorbée sera correcte pour toute condition d'équilibrage des charges dans les trois phases, et pour toute forme d'onde du courant et du voltage, alors que si l'on emploie le diagramme de la figure 2, la puissance n'est correcte que si les phases sont équilibrées et si le courant et le voltage suivent la loi sinusoïdale.

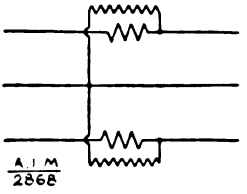


Fig. 1.

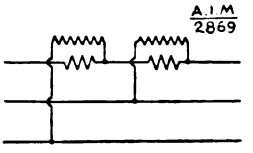


Fig. 2.

Le défaut d'équilibrage des phases dans les moteurs triphasés est souvent suffisant pour produire des erreurs considérables lorsque l'on utilise la méthode de la figure 2. C'est ainsi que nous avons trouvé que l'insertion dans le circuit d'un ampèremètre ou de la bobine de courant d'un

Digitized by Google

wattmètre peut causer des changements appréciables dans la lecture des wattmètres.

De ce chef, l'utilisation des connections suivant la figure 1 est préférable à celle de la figure 2 pour la détermination de la puissance.

Dans toutes ces méthodes, excepté dans celle montrée à la figure 1, nous admettons que les phases sont équilibrées, ce qui est approximativement le cas, surtout lorsque le moteur est chargé.

Si les phases ne sont pas équilibrées, le facteur de puissance du moteur devient une quantité difficile à définir, puisque nous nous trouvons en présence d'un facteur de puissance différent dans chaque phase.

Nous supposerons que l'équilibrage est suffisamment bon pour qu'une des méthodes décrite ci-haut puisse être adoptée.

Les méthodes que nous venons de discuter ne conduisent généralement pas à des résultats concordants, ce qui n'est d'ailleurs pas à espérer par l'examen des hypothèses sur lesquelles elles sont basées.

La méthode n° I implique la mesure de la puissance absorbée du voltage et du courant. Aucune hypothèse n'est faite au delà de celle qui concerne l'équilibrage.

La méthode n° II implique la mesure de la puissance par des wattmètres et elle admet que les phases sont équilibrées et, de plus, que le courant et le voltage suivent la loi sinusoïdale. C'est très rarement le cas, même quand le générateur fournissant le courant donne un voltage suivant la loi sinusoïdale à circuit ouvert.

La méthode n° III implique la mesure du courant magnétisant et la réactance au voltage donné. Quand ceux-ci sont déterminés, le facteur de puissance peut être calculé pour toute charge et à tout voltage sans essai, c'est-à-dire qu'aucun essai en charge n'est requis.

Digitized by Google

Le courant magnétisant est obtenu aisément, mais la détermination de la réactance est une question difficile, ainsi que nous le verrons ci-dessous.

Les hypothèses faites sont les mêmes que celles de la méthode n° II. De plus, l'on suppose que le voltage de la ligne et la force contre-électromotrice dans le rotor sont égaux et que le courant magnétisant et la perte de flux sont constants à toutes les charges, ce qui revient à dire que la réactance du moteur est une constante. Comme nous le verrons ci-après, les facteurs de puissance obtenus par ces diverses méthodes diffèrent quelquefois de plusieurs pour cent, tantôt c'est une méthode qui donne des résultats supérieurs, et tantôt c'est une autre.

Nous avons fait très souvent des essais dans lesquels les deux premières méthodes sont en parfait accord, et nous avons alors admis que toutes les suppositions faites étaient réalisées. Plus souvent cependant, nous avons trouvé des différences.

Quelquefois, l'utilisation des instruments à lecture directe est préconisée pour déterminer le facteur de puissance. Ces instruments ne sont cependant pas recommandables, car ils sont peu exacts et difficiles à calibrer.

L'emploi d'un simple wattmètre inséré dans une phase n'est à recommander que lorsque les phases sont particulièrement bien équilibrées.

De ces considérations, nous sommes arrivés à la conclusion que la méthode n° I avec l'emploi des connexions de la figure 1 est préférable aux autres et devraient être généralement adoptée.

LA RÉSISTANCE ET LA RÉACTANCE

Pour déterminer la résistance et la réactance du moteur, ce dernier est maintenu dans une position fixe avec rotor en court-circuit.

Digitized by Google

On mesure alors le courant C et la puissance absorbée W pour différentes valeurs du voltage V. L'impédance par phase est obtenue en divisant le voltage par phase par le courant par phase. De plus $Z^2 = R^2 + X^2$.

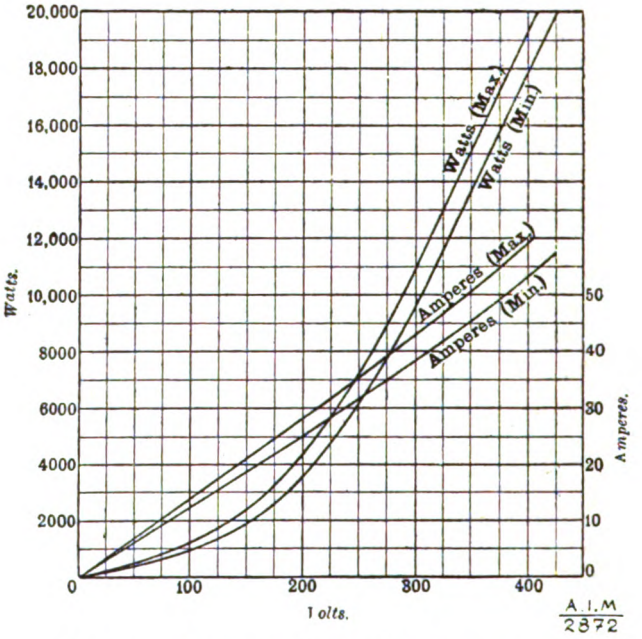


Fig. 3. — Moteur nº I. Essai en court-circuit.

Dans cette formule, R est la résistance totale du moteur par phase et X la réactance totale du moteur par phase, d'où il s'ensuit que $R = Z \cos \varphi$ et $X = Z \sin \varphi$

$$\cos \varphi = \frac{\text{puissance absorbée}}{\sqrt{3}\ V\ C}.$$

Les valeurs R et X obtenues de cette manière varient avec la position dans laquelle le rotor est maintenu et le voltage aux bornes.

Digitized by Google

On doit naturellement s'attendre à cela, car les fuites magnétiques dépendent de la position relative du rotor par rapport au stator ; et la saturation du circuit magnétique du moteur dépend du voltage appliqué.

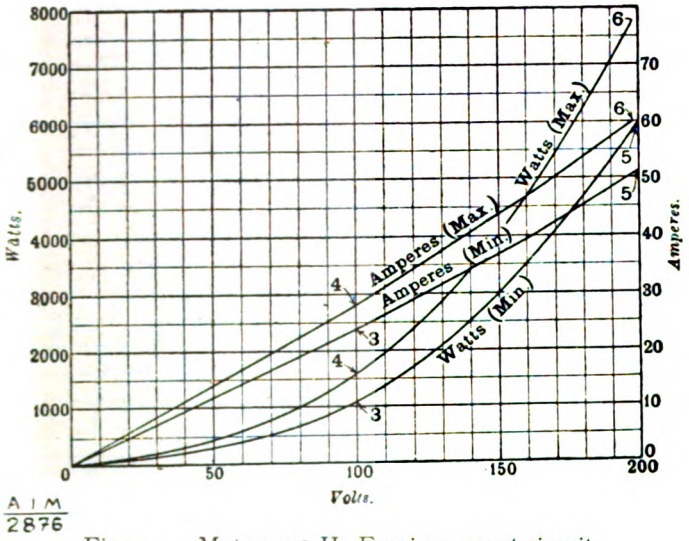


Fig. 4. — Moteur n° II. Essai en court-circuit:

La valeur de la résistance obtenue de cette manière est généralement plus élevée que la valeur obtenue en mesurant au moyen du courant continu. C'est en partie dû au fait que le moteur s'échauffe au cours de l'essai et aussi par le fait que les pertes par hystérésis dans le rotor augmentent la valeur apparente de la résistance.

Toutefois, comme cet essai est généralement fait à un voltage considérablement inférieur au voltage normal, ces pertes par hystérésis ne sont en général pas bien grandes, mais une correction peut être faite pour celles-ci, si nécessaire. A cet effet, on mesure la puissance absorbée dans le moteur à l'arrêt, au voltage auquel l'essai a été fait en court-circuit, en ouvrant le secondaire.

Digitized by Google

La puissance absorbée par phase, divisée par le carré du courant qui passe dans le moteur dans l'essai en court-circuit, donne l'augmentation apparente de résistance par phase due aux pertes dans le fer.

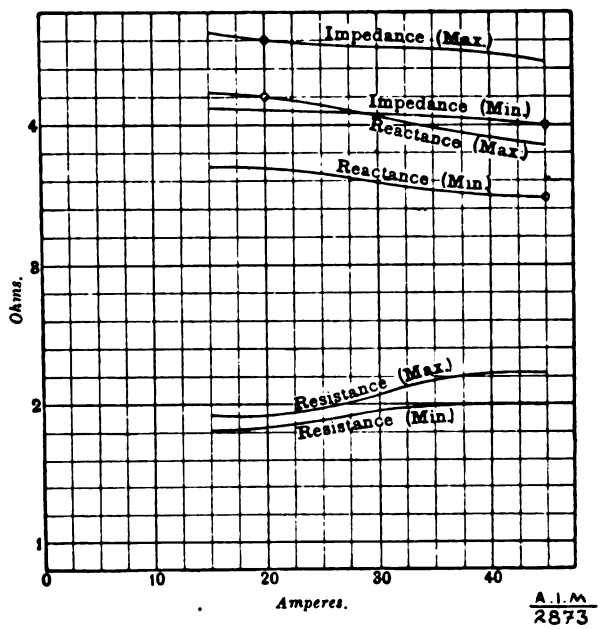


Fig. 5. — Moteur n° I.

Nous avons trouvé, en essayant une grande quantité de moteurs, que les latitudes que les méthodes ci-haut permettent dans les valeurs de la résistance et de la réactance du moteur sont considérables et suffisantes pour avoir un effet très marqué sur la performance calculée du moteur.

Les courbes données plus loin et les figures 8 et 9 peuvent être considérées comme typiques, car elles donnent une illustration de la manière dont la résistance

Digitized by Google

et la réactance peuvent varier avec les conditions d'essai.

La différence entre la résistance du moteur, mesurée par courant continu à 20°, et celle déduite de l'essai en court-circuit, peut varier entre 10 et 60 % pour les divers moteurs.

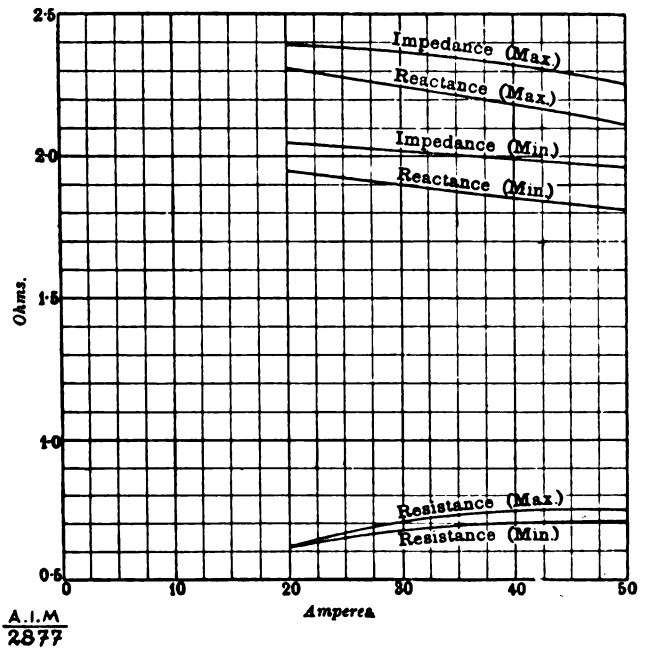


Fig. 6 — Moteur n° II.

On voit donc que si cette provision est faite pour tenir compte de l'échauffement de l'enroulement en augmentant la résistance mesurée par courant continu, la valeur obtenue par l'essai en court-circuit peut parfois être considérablement plus élevée que la valeur obtenue par l'autre méthode.

Dans le cas particulier des moteurs I et II les résultats

Digitized by Google

suivants, qui peuvent être considérés comme typiques, ont été obtenus :

		Moteur I	Moteur II
Résistance par phase (par courant continu) à 20° C	stator	0,775	0,29
	rotor	0,0184	0,085
Résistance après marche en pleine charge (par courant continu)	stator	0,90	0,323
	rotor	0,0211	0,096
Rapport des enroulements		6,33	1,93
Résistance du rotor réduite (à 20° C)		0,737	0,318
Résistance du rotor réduite (à chaud)		0,88	0,357
Résistance totale par phase (à 20° C) par courant continu		1,512	0,608
Résistance totale par phase (à chaud) par courant continu		1,78	0,68
Résistance par phase déduite de l'essai en court-circuit (val. max.)		2,20	0,75
Résistance par phase déduite de l'essai en court-circuit (val. min.)		1,80	0,62

La réactance pour ces deux mêmes moteurs obtenue par l'essai en court-circuit varie entre les deux limites :

		Max.	Min.
Moteur I.	Reactance par phase	4,25	3,50
Moteur II.	Réactance par phase	2,30	1,80

COURANT MAGNÉTISANT ET PERTES A VIDE.

Plusieurs des méthodes que nous avons décrites impliquent la détermination du courant magnétisant, des pertes dans le fer et des pertes par friction. Ces quantités sont ordinairement obtenues en faisant marcher le moteur à vide pendant un temps suffisant pour que les paliers s'échauffent. On mesure alors la puissance absorbée et le courant en faisant varier le voltage de 20 % au-dessus de

Digitized by Google

la valeur normale, jusqu'au moment où le moteur s'arrête. Si les pertes dans le cuivre du stator pour chaque valeur de courant sont déduites de la puissance totale absorbée, la quantité restante constituera la perte dans le fer et la

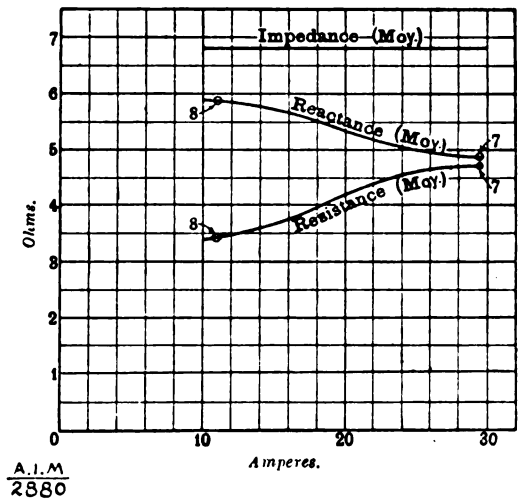


Fig. 7. — Moteur n° III.

perte par friction. Si cette quantité est portée en fonction du voltage (voir fig. 8), on aura une courbe. On pourra, en la prolongeant vers le bas, lui faire couper l'axe des ordonnées pour la valeur o du voltage. Le point d'intersection représentera la perte à o volt, soit la perte par friction.

La supposition faite ici est que les pertes dans le circuit du rotor à vide sont négligeables et que les pertes par friction restent constantes pendant toute la durée de l'essai à voltage variable et constant.

Comme la vitesse dans cet essai varie à peine, cette dernière supposition ne sera pas bien loin de la vérité. D'ailleurs, si la perte par friction est trop élevée, il y a

Digitized by Google

sous-estimation de la perte dans le fer, et en examinant les calculs ci-dessous, l'erreur introduite de ce chef est très minime.

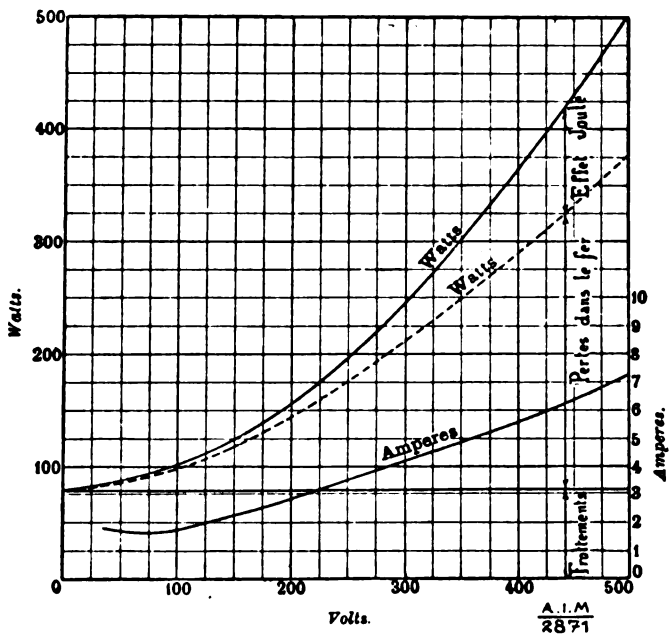


Fig. 8. — Moteur I. Essai à vide.

DES MÉTHODES DE CALCUL DES RÉSULTATS D'ESSAIS

I. *Méthodes qui n'exigent pas l'essai en charge.*

Méthode A. — Le diagramme Heyland. C'est une méthode graphique qui permet assez bien de variations. Les ouvrages techniques donnent des diagrammes contenant des raffinements de calcul dont nous n'avons pas tenu compte, car ils impliquent des dessins qui ne rentrent pas dans les calculs commerciaux.

En pratique, une forme simple de diagramme est

Digitized by Google

utilisée et justifiée par les considérations que les corrections obtenues par les formes plus élaborées des diagrammes sont d'un ordre inférieur à celles qui peuvent provenir des différences dues à la latitude qui existe dans le choix de la position des points de court-circuit D (fig. 9), grâce à la quantité des valeurs de la réactance que l'on obtient dans l'essai à court-circuit.

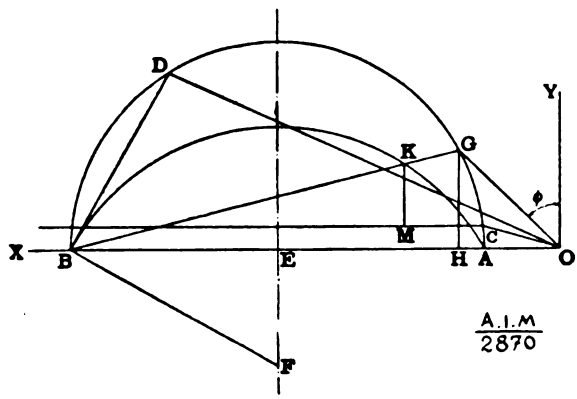


Fig. 9.

La méthode que nous avons utilisée en appliquant le diagramme Heyland pour calculer les résultats d'essais discutés ci-dessous peut être expliquée en se référant à la figure 4.

Dans ce diagramme O C et O D sont des vecteurs représentant le courant à vide et le courant en court-circuit.

Ces droites sont inclinées par rapport au voltage O Y suivant angles déduits du facteur de puissance dans chaque cas.

Du centre (E sur l'axe O X), on trace un cercle par les points C et D, rencontrant O X en A et B. B F est une droite perpendiculaire à D B, faisant intersection

Digitized by Google

avec la verticale passant par E au point F ; en prenant F comme centre, on trace un cercle passant par A et B. Si O G est le courant à une charge quelconque, le facteur de puissance est à cette charge : cos Y O G ; la puissance absorbée est G H, la puissance effective est K M et le rendement est K M/G H. Par cette méthode on voit donc qu'il suffit de faire l'essai en court-circuit et l'essai à vide.

Méthode B. Méthode Steinmetz. Cette méthode est algébrique et peut être décrite succinctement comme suit :

En employant la notation ordinaire et en appelant s le pourcentage de glissement, r_1 et r_2, la résistance primaire et secondaire, x_1 et x_2, la réactance primaire et secondaire à la fréquence du circuit.

L'impédance primaire et la secondaire peuvent être exprimées par les expressions suivantes : $r_1 - jx_1$ et $r_2 - jsx_2$.

Si E est la force contre-électromotrice primaire par phase, le courant secondaire est donné par la formule :

$$C_2 = \frac{sE}{r_2 - jsx_2} = E(a_1 + ja_2)$$

ou

$$a_1 = \frac{sr_2}{r^2_2 + s^2 x^2_2} \quad \text{et} \quad a_2 = \frac{s^2 x_2}{r^2_2 + s^2 x^2_2}$$

Si le courant à vide est E $(g + jb)$, gE est la composante wattée du courant à vide correspondant aux pertes par hystérésis, moins les pertes par friction, et bE est la composante déwattée de ce courant, ou le courant magnétisant. On en déduit que le courant primaire peut être exprimé par :

$$C_1 = E(b_1 + jb_2),$$

ou

$$b_1 = a_1 + g \quad \text{et} \quad b_2 = a_2 + b.$$

Digitized by Google

le voltage primaire aux bornes est

$$E_p = E + C_1 (r_1 - j x_1) = E + E (b_1 + j b_2)(r_1 - j x_1)$$
$$= E (d_1 + j d_2)$$

où

$$d_1 = 1 + r_1 b_1 + x_1 b_2 \quad \text{et} \quad d_2 = r_1 b_2 - x_1 b_1)$$

d'où

$$(E_p)_{eff} = (E)_{eff} \sqrt{d^2_1 + d^2_2} \quad \text{et} \quad (C_1)_{eff} = \sqrt{b^2_1 + b^2_2}$$

La puissance effective par phase $= E^2 a_1 (1 - s) -$ pertes par friction.

La puissance absorbée par phase $= E^2 (b_1 d_1 + b_2 d_2)$

De là, on peut déduire le facteur de puissance et le rendement de la façon ordinaire.

Le procédé pratique de calcul est de prendre une série de valeurs du glissement en déterminant pour chacune de ces valeurs le facteur de puissance et de rendement en suivant la méthode ci-haut.

Les quantités qui doivent être déterminées par des essais sont g, b, la perte par friction, r_1, r_2, x_1, x_2.

Les valeurs g, b, et les pertes par friction sont obtenues de l'essai à vide ; r_1, r_2, x_1, x_2 des mesures à vide et en court-circuit. L'essai en court-circuit donne les valeurs $(r_1 + r_2)$ et $x_1 + x_2)$ en utilisant les méthodes déjà décrites.

On voit qu'en plus de la difficulté de choisir des valeurs convenables pour la résistance et la réactance des essais, il y a la difficulté de diviser ces valeurs correctement entre le stator et le rotor.

Dans le calcul, nous avons divisé la résistance $(r_1 + r_2)$ en mesurant la résistance du stator r_1, et en faisant la différence, pour la réactance $(x_1 + x_2)$ nous l'avons divisée en deux quantités égales. Ceci est suffisamment correct pour tous les besoins, étant donné que l'influence sur les résultats d'une division qui s'écarte quelque peu de la réalité est très peu sensible.

Digitized by Google

Cette méthode exige seulement un essai à vide et un essai à court-circuit.

II. *Méthodes qui exigent l'essai en charge du moteur.* Il est souvent possible d'essayer le moteur en charge sans pouvoir cependant faire usage d'un frein.

Dans ces circonstances, le facteur de puissance est déterminé par la méthode I ou II, mais la puissance effective doit être déduite indirectement.

A cet effet, on doit de nouveau faire l'essai à vide et en court-circuit et on peut calculer le rendement par une des méthodes C, D, ou F, décrites ci-dessous.

Méthode C. Nous supposons que les essais à vide, en court-circuit et en charge (qui impliquent la mesure du glissement, mais sans essais au frein) ont été faits.

Supposons que l'essai à vide au voltage normal E donne la puissance absorbée W_0 watts et le courant C_0 et que dans l'essai à vide la puissance absorbée est divisée en deux parties, l'une W_h pertes par hystérésis et W_f pertes par friction (fig. 8). Le glissement du moteur en charge lorsque le courant est égal à C et la puissance absorbée W est mesurée : s %.

Il est important que ce glissement soit déterminé aussi exactement que possible. Il est à recommander de le mesurer directement de préférence à l'obtenir par différence en mesurant la vitesse actuelle et en la déduisant de la vitesse synchronique.

La puissance utile et le rendement peuvent être déterminés de la façon suivante : Si r est la résistance mesurée entre deux bornes du stator, corrigée pour augmentation de température à la fin de l'essai, les pertes dans le stator seront $1{,}5\ C^2 r$ watts. Comme la puissance absorbée est W watts, la puissance fournie au rotor est $W - 1{,}5\ C^2 r - W_h$.

De cette puissance, s % sont perdus dans le rotor, en

Digitized by Google

pertes dans le cuivre, c'est-à-dire que la puissance utile devient :

$$\frac{s}{100}(W - 1{,}5.C^2 r - W_h) - W_f.$$

De ce chiffre et de la valeur de la puissance absorbée mesurée, on peut déduire le rendement. Le facteur de puissance est calculé par le rapport entre la puissance absorbée et le produit des volt-ampères dans l'essai en charge.

Méthode D. — Cette méthode, qui a été imaginée par l'auteur, a déjà été décrite précédemment dans le Bulletin de l'Association en 1909, auquel nous renvoyons nos lecteurs [1].

En résumé, cette méthode tient compte de la variation de réactance dans le moteur avec le courant, et des variations du courant magnétisant avec la valeur de la force contre-électromotrice. Le rendement est calculé comme dans la méthode C.

Méthode E. — Dans les cas où il est possible de mesurer la puissance absorbée avec un frein, les mesures prises dans l'essai à vide et en court-circuit ne sont pas nécessaires pour la détermination des caractéristiques du moteur en charge.

Les mesures électriques comprennent : la détermination pour divers régimes de la puissance absorbée du voltage aux bornes et du courant.

De celle-ci on peut déduire le facteur de puissance, soit par la méthode I ou la méthode II, décrites dans la partie de ce travail affectée aux facteurs de puissance.

Le rendement peut être calculé en faisant le rapport des mesures de la puissance au frein et de la puissance absorbée.

---

[1] Mossay. *Bulletin de l'Association des Ingénieurs sortis de l'Institut Montefiore*, t. IX, 1909, page 413, fasc. 8.

Digitized by Google

C'est la méthode la plus directe et si on y joint la détermination du facteur de puissance par la méthode I, c'est la méthode qui comprend le moins d'aléas. Son adoption est à recommander partout où elle est possible.

Malheureusement, l'essai au frein est quelquefois impossible, notamment dans le cas de machines marchant à grande vitesse, telles que les turbo-moteurs, ou les machines à marche très lente et à régime variable telles que les machines d'extraction, machines de laminoirs, etc.

Méthode F. — Nous avons rencontré l'application d'une méthode qui se rapproche de la méthode C pour la détermination du rendement et diffère par le fait que la puissance absorbée en charge n'est pas mesurée par les wattmètres, mais est déduite par les volt-ampères et facteur de puissance calculé suivant la méthode III.

On remarque, immédiatement, que par ce procédé toute erreur introduite dans la valeur du facteur de puissance influe sur les valeurs du rendement.

Nous avons d'ailleurs trouvé que les valeurs de la puissance absorbée par le moteur, déduite de cette façon, diffèrent considérablement des valeurs qui sont déterminées pratiquement par les wattmètres.

Ce fait peut être illustré par l'essai du moteur n° 1 ci-dessous.

Dans ce moteur, les quantités W ont été obtenues par la lecture des wattmètres et les quantités W′ ont été calculées de la manière indiquée ci-dessus.

Ampères	10	15	20	25	30	35	40
W	4,650	9,580	13,200	16,350	18,870	21,100	23,000
W′	4,960	8,920	12,200	15,130	17,600	19,500	20,800

Les différences accusées par ce tableau vont jusqu'à

Digitized by Google

10 %, ce qui tend à démontrer que la méthode de détermination du facteur de puissance employée en ce cas est sujette à caution.

Les valeurs du rendement obtenues en utilisant ces deux séries de valeurs ne diffèrent pas autant que les valeurs du facteur de puissance, car la puissance actuelle est déduite de la puissance absorbée par soustraction des pertes, c'est-à-dire qu'une valeur faible pour la puissance absorbée correspond à une valeur faible également pour la puissance utile.

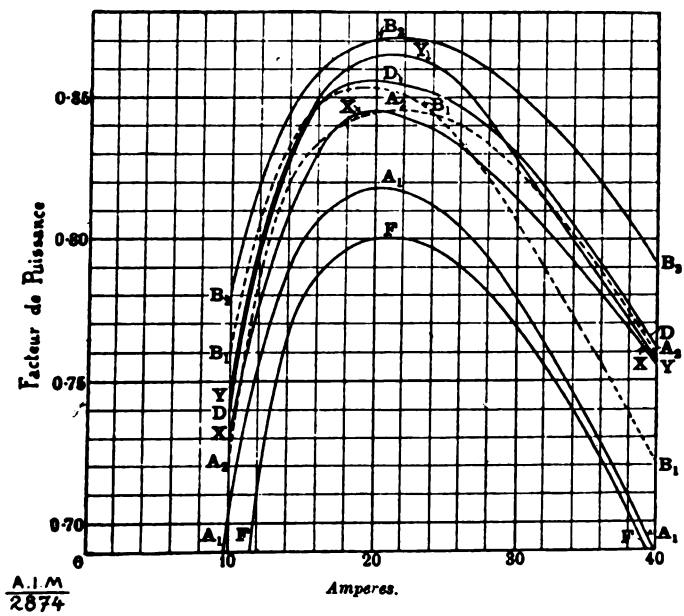


Fig. 10. — Moteur n° I.

Les valeurs du facteur de puissance et du rendement obtenues en utilisant les deux séries de valeurs W et W' pour le moteur n° I sont données dans le tableau n° II et dans les figures 10 et 11 sous les initiales D. F.

Digitized by Google

Comme on pourra le remarquer, le facteur de puissance y varie d'environ 10 % et la valeur du rendement varie de 1 %.

Dans les figures 3 à 14, nous avons donné des résultats d'essais de 3 moteurs fabriqués par différentes maisons et les valeurs du facteur de puissance et du rendement obtenues en utilisant les diverses méthodes qui ont été décrites ci-haut.

Dans les tableaux et courbes, les lettres A à F indiquent la méthode employée pour obtenir les résultats.

MOTEUR I. (Fig. 3, 5, 8, 10 et 11).

10 HP, 12 pôles, 440 volts, 57 cycles. Stator et Rotor connectés en étoile.

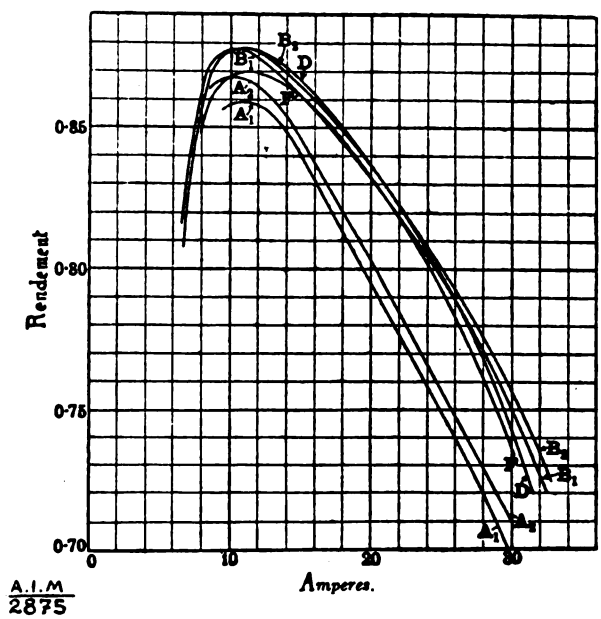


Fig. 11. — Moteur n° I.

Digitized by Google

Courant magnétisant . . . . . 6,18 ampères.
Pertes par friction . . . . . 80 watts.
Pertes par hystérésis . . . . . 225 watts.

Les courbes A_1 et A_2 sont obtenues des diagrammes Heyland constitués par les valeurs d'impédance 4.6 et 4.04 (Voir fig. 5).

Les courbes B_1 et B_2 sont obtenues par la méthode Steinmetz.

Pour obtenir les courbes B_1 et B_2 suivant la méthode Steinmetz, nous avons utilisé les valeurs suivantes : $r_1 = 0.847$, $r_2 = 0.90$, $g = 0.00132$, $b = 0.0244$; pour B_1 les valeurs $x_1 = x_2 = 2.1$; et pour B_2 les valeurs $x_1 = x_2 = 1.75$.

Les courbes D et F obtenues sont reprises dans le tableau I.

La courbe X donne le facteur de puissance déduit en utilsisant le rapport des lectures du wattmètre, et la courbe Y en prenant le rapport de la puissance absorbée au produit des volt-ampères.

Les facteurs de puissance et de rendement obtenus par les diverses méthodes sont repris au tableau nº II.

TABLEAU I. — Moteur Nº I.

Ampères	10	15	20	25	30	35	40
°/o glissement .	2.1	4	6	9	13	16	21
e/V. C_m/C. . .	0.516	0.312	0.205	0.146	0.109	0.086	0.062
Cx/V.	0.158	0.23	0.31	0.38	0.45	0.52	0.51

MOTEUR II. (Fig. 4, 6 et 12).

15 HP, 4 pôles, 380 volts, 50 cycles.
Stator et rotor connectés en étoile.
Courant magnétisant 8.68 ampères.

Digitized by Google

Les 4 courbes de la fig. n° 12 sont obtenues par le diagramme Heyland.

Le point D étant déterminé par l'essai en court-circuit à 100 ou 200 volts et en utilisant pour chacun de ces voltages la position du rotor donnant le maximum et le minimum pour la réactance.

Les résultats de l'essai en court-circuit étaient les suivants :

TABLEAU II. — Moteur N° 1.

Facteur de puissance en °/o.

Ampères	10	15	20	25	30	35	40
A_1.	70.0	80.0	81.8	80.8	77.9	73.7	69.0
A_2.	72.2	82.8	84.5	84.3	82.4	79.5	76.0
B_1.	76.0	84.8	85.3	84.0	80.7	76.5	72.0
B_2.	78.0	85.3	87.1	86.8	85.2	82.6	79.2
D.	74.0	84.0	85.6	85.0	83.0	79.5	75.8
F.	65.0	78.0	80.0	79.4	77.0	73.2	68.3
X.	72.9	81.8	84.4	83.7	81.3	78.5	75.7
Y.	74.2	84.0	86.5	85.8	82.7	79.2	75.4
Rendement en °/o.							
A_1.	85.7	84.0	79.5	75.0	69.5	54.4	....
A_2.	86.7	84.5	80.3	75.6	71.0	58.2	....
B_1.	87.8	86.1	83.1	79.6	75.0	69.5	63.6
B_2.	87.8	86.5	83.6	80.0	75.7	71.0	65.9
D.	87.7	86.7	83.7	79.7	74.3	69.7	63.2
F.	86.7	86.5	83.2	79.0	73.4	68.6	61.7

—	Volts	Ampères	Watts	Cos φ	Résistance	Réactance
A_3. . .	100	24.2	1,190	0.285	0.680	2.29
A_4. . .	100	28.5	1,600	0.324	0.656	1.92
A_5. . .	200	51.8	6,100	0.340	0.758	2.10
A_6. . .	198	60.0	7,750	0.377	0.718	1.77

Digitized by Google

Les points correspondant sur les courbes de la fig. 4 sont marqués 3, 4, 5, 6.

Les valeurs obtenues pour le facteur de puissance sont données dans le tableau n° III, lequel correspond à la fig. 12.

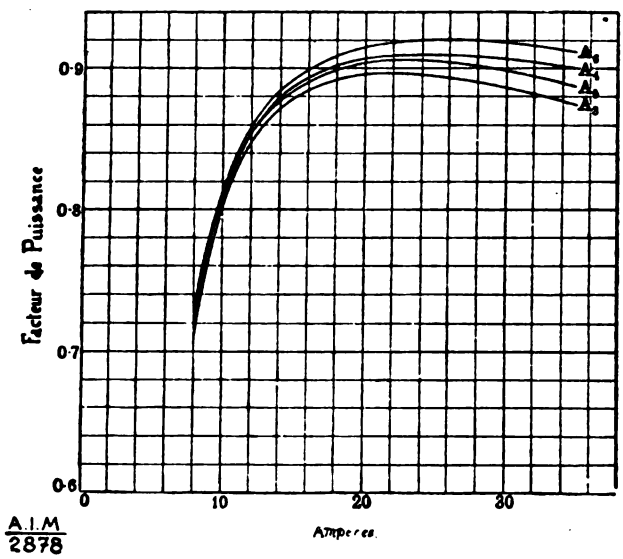


Fig. 12. — Moteur n° II.

TABLEAU N° III.

Facteur de puissance en °/o.

Ampères	35	30	25	20	17	14	11
A_6 . . .	91.2	91.7	91.7	91.5	90.0	88.2	83.7
A_4 . . .	90.0	90.7	90.8	90.9	89.7	88.0	83.7
A_5 . . .	88.7	89.7	90.0	90.5	88.8	87.5	83.6
A_3 . . .	87.5	88.7	89.3	89.5	88.2	87.1	83.1

Digitized by Google

MOTEUR III. (Méthode D). Fig. 7, 13 et 14.

3,5 HP, 4 pôles, 220 volts, 50 cycles.

Stator connecté en triangle. Rotor en cage d'écureuil.

Les courants donnés dans les courbes et le texte sont les courants qui circulent dans chacune des phases du moteur.

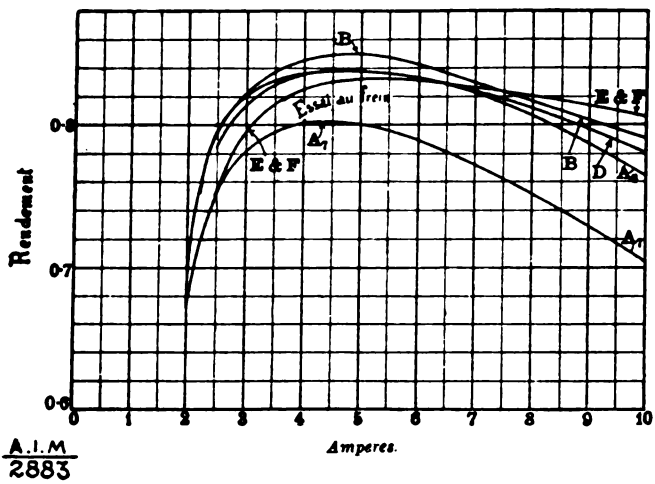


Fig. 13. — Moteur n° III.

Courant magnétisant . . . . . 1.67 ampères.
Perte par hystérésis . . . . . 125 watts.
Friction. . . . . 75 watts.

Les courbes A_7, A_8, obtenues par le diagramme Heyland, en utilisant les valeurs déduites du court-circuit marquées 7 et 8 à la fig. 7 donnent les valeurs suivantes pour la résistance et la réactance :

—	Volts	Ampères	Watts	Cos φ	Résistance	Réactance
A_7 . . .	200	29.4	12,400	0.703	4.79	4.84
A_8 . . .	75	11.0	1,200	0.485	3.31	5.97

Digitized by Google

La courbe B, obtenue par la méthode Steinmetz, utilise les valeurs suivantes :

$r_1 = 2$; $r_2 = 1.6$; $g = 0.0017$; $b = 0.00835$; $x_1 = x_2 = 2.9$.

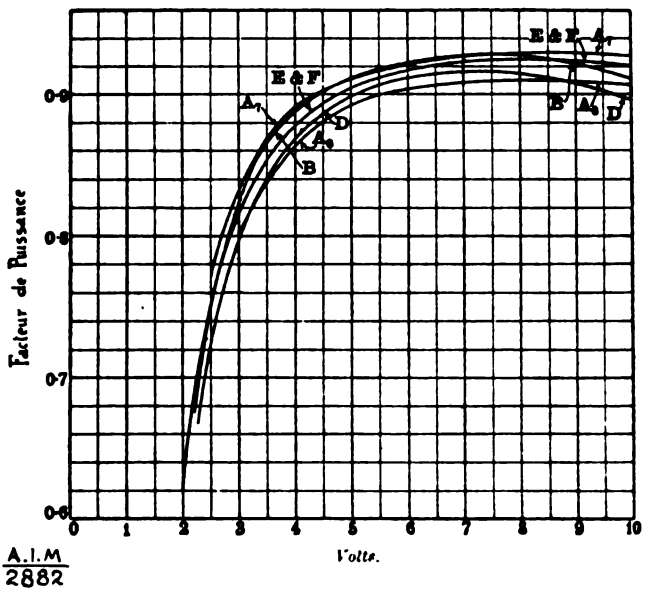


Fig. 14. — Moteur n° III.

La courbe D, obtenue en utilisant la relation qui existe entre le courant et le glissement suivant la construction donnée par la méthode de l'auteur.

Δ-ampères.	1.96	2.49	3.81	4.62	6.30	7.22
°/o de glissement . .	0.93	1.27	2.33	3.00	4.40	5.20

La courbe E-F est obtenue par la combinaison des méthodes E et F ; la puissance utile étant déterminée par un essai au frein (Méthode E) et la puissance absorbée étant calculée suivant la méthode F.

Les valeurs maximum et minimum ne sont pas fournies

Digitized by Google

séparément, étant donné que les écarts de l'impédance, pour différentes positions de rotor, étaient en ce cas très minimes. Les valeurs sont donc des valeurs moyennes.

Dans le présent travail, nous n'avons pas tenté de donner une description minutieuse des nombreuses méthodes employées pour essayer les moteurs triphasés.

Toutefois nous croyons avoir accumulé suffisamment de matériaux pour justifier notre prétention qu'une normalisation des méthodes serait désirable au point de vue commercial.

Dans le cas où un tel essai serait tenté, il serait nécessaire de considérer d'abord les procédés d'expérimentation et ensuite les méthodes à employer pour le calcul des résultats d'essais.(1)

P. A. MOSSAY.

(1) Communication faite à la séance du 25 mai 1913 (Voir *Bulletin de l'A. I. M.*, t. XIII. 1913, p. 207, fasc. 5). Le texte a été rédigé d'après un article publié par l'auteur, en collaboration avec M. A. J. Makower, dans l' « *Electrician* » (19 et 26 avril 1912).

Digitized by Google

538.3 **Cinq notes sur divers sujets d'électrotechnique.**

1. Une remarque curieuse sur l'énergie potentielle relative d'une charge statique dans un champ uniforme. — 2. L'action mécanique entre deux éléments de courant. — 3. Extension des lemmes de Kirchhoff à l'état variable. — 4. Sur la pression latérale des tubes de force. — 5. La fonction de court-circuit dans les machines à collecteur.

---

1. Une remarque curieuse sur l'énergie potentielle relative d'une charge statique dans un champ uniforme.

Soit (voir fig. 1) un champ uniforme indéfini d'intensité H_1 dirigé parallèlement à Ox; en O, une charge q.

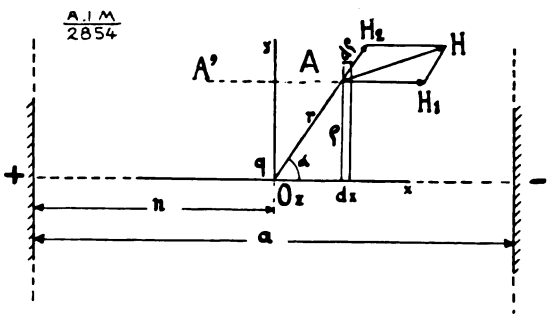


Fig. 1.

En un point A (x, y) du plan des xy, l'intensité du champ produit par q est, si ε est la constante diélectrique du milieu, $H_2 = q/\varepsilon\, r^2$ suivant OA. Le champ résultant H est tel que

$$H^2 = H_1^2 + H_2^2 + 2\, H_1\, H_1 \cos \alpha. \qquad (1)$$

Digitized by Google

L'énergie potentielle d'un élément de volume dt situé en A est

$$\frac{\varepsilon H^2}{8\pi} dt.$$

D'après (1), cette énergie comprend : un terme en H_1^2 qui est l'énergie due au champ uniforme seul ; un terme en H_2^2, dû à q seul, et un terme en $H_1 H_2$ dû à la coexistence de ces deux causes ; ce dernier terme est l'énergie relative du champ uniforme et de la charge

$$d^3 W = \frac{\varepsilon H_1 H_2}{4\pi} \cos \alpha \, . \, dt$$

Remarquons tout d'abord que, en A' symétrique de A par rapport au plan des yz, d^3 W a la même valeur qu'en A, mais de signe contraire. *Dans le champ indéfini, l'énergie relative serait donc nulle.* Elle est en fait indéterminée ainsi qu'on le verra plus loin.

Calculons l'énergie relative d'une tranche comprise entre les deux plans indéfinis, perpendiculaires à l'axe des x, caractérisés par x et $x + dx$.

Intégrons d'abord d^3 W dans l'anneau élémentaire de section rectangulaire $dx \, d\varsigma$, et de révolution autour de Ox ; H_1 H_2 α restent constants ; $\int dt = 2\pi\varsigma \, . \, d\varsigma \, dx$, donc

$$d^2 W = \frac{\varepsilon H_1 H_2}{2} \varsigma \cos \alpha \, d\varsigma \, dx.$$

Exprimons toutes les variables, dans la tranche considérée, en fonction de x et de α. On a :

$$H_2 = \frac{q}{\varepsilon x^2} \cos^2 \alpha$$

$$\varsigma = x \operatorname{tang} \alpha$$

$$d\varsigma = x \frac{d\alpha}{\cos^2 \alpha}$$

Digitized by Google

Il vient donc :

$$d^2 W = \frac{\varepsilon H_1}{2} \frac{q}{\varepsilon x^2} \cos^2 \alpha . x \operatorname{tang} \alpha \cos \alpha . x \frac{d\alpha}{\cos^2 \alpha} \cdot dx$$

$$= \frac{-q H_1}{2} dx . d(\cos \alpha)$$

Intégrons maintenant pour toute la tranche d'épaisseur dx, en faisant varier α de O à $\pi/2$. Nous obtenons

$$d W = \frac{q H_1}{2} dx. \qquad (2)$$

Ainsi, *l'énergie relative de la tranche est indépendante de sa distance x par rapport à q ; elle est proportionnelle à son épaisseur dx; elle change de signe selon qu'on se place à droite ou à gauche de q.*

Or, le champ exerce sur la charge q un effort $F = q H_1$, suivant Ox. Si q se déplace de dn suivant On, cet effort effectue un travail $F\, dn = q H_1 dn$, travail qui doit diminuer l'énergie relative d'une quantité égale.

D'autre part, en milieu infini dans tous les sens, nous venons de voir que W, énergie relative, comprend autant de termes dW positifs à droite de q, que de termes négatifs à gauche de q et égaux en grandeur absolue. Son intégrale W semble donc devoir être nulle. Toutefois, il faut noter que $W_{\text{droite}} = \infty$; $W_{\text{gauche}} = \infty$; $W = \infty - \infty$, ce qui est l'indétermination.

Pour déterminer le problème, supposons le champ non plus indéfini, mais limité à gauche et à droite à des distances n et $(a - n)$ de O, par des plans *conducteurs* indéfinis perpendiculaires à Ox. Ces plans sont supposés porter des charges uniformément réparties, *ces charges comprenant les charges induites sur les plans par la charge q*, charges qui dépendent au surplus de n de manière à n'avoir toujours en présence, entre les deux plans, que le

Digitized by Google

champ uniforme H_1 constant, et le champ produit par q considéré seul. L'énergie potentielle relative du système est, d'après (2),

$$W = \frac{q H_1}{2} [(a - n) - n] = \frac{q H_1}{2} (a - 2 n)$$

Déplaçons maintenant, par rapport aux plans conducteurs fixes, la charge q de dn dans le sens Ox. L'énergie relative s'accroît de

$$dW = - q H_1 dn$$

et l'on a bien

$$F dn = - dW.$$

2. L'action mécanique entre deux éléments de courant.

Considérons (fig. 2) dans un système d'axes coordonnés rectangulaires, un élément de conducteur filiforme de longueur ds, caractérisé par les cosinus directeurs α, β, γ, parcouru par un courant d'intensité i, dans le sens déter-

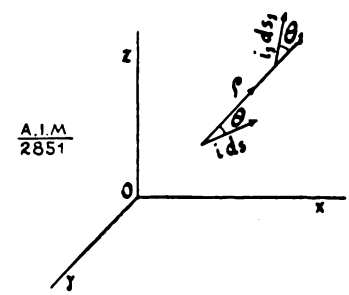


Fig. 2.

miné par ces cosinus, et un second élément ds_1 α_1 β_1 γ_1 i_1 distant du premier d'une longueur ς ayant pour projections $l m n$, dans le sens allant du premier au deuxième élément, soit μ la perméabilité magnétique du milieu.

Digitized by Google

Le premier élément produit, à l'endroit occupé par le second, une intensité de champ magnétique $d\mathrm{H}$ de direction $\lambda\mu\nu$, et il en résulte sur ce second élément de courant un effort $d\mathrm{F}$ de direction pqr.

L'angle ε entre les deux éléments est déterminé par

$$\cos\varepsilon = \alpha\alpha_1 + \beta\beta_1 + \gamma\gamma_1.$$

Les angles θ et θ_1 entre les éléments et l'alignement ς sont déterminés par

$$\cos\theta = l\alpha + m\beta + n\gamma$$
$$\cos\theta_1 = l\alpha_1 + m\beta_1 + n\gamma_1.$$

L'intensité de champ $d\mathrm{H}$ est perpendiculaire au plan de ς et de ds, et son sens est donné par la règle du tire-bouchon, par rapport à i. On aura donc

$$\lambda = \frac{m\gamma - n\beta}{\sin\theta} \qquad \mu = \frac{n\alpha - l\gamma}{\sin\theta} \qquad \nu = \frac{l\beta - m\alpha}{\sin\theta}$$

L'effort $d\mathrm{F}$ est perpendiculaire au plan de $d\mathrm{H}$ et de ds_1, et son sens est donné par la règle des trois doigts (main gauche ; pouce, effort ; index, intensité de champ ; majeur replié, courant).

On a donc, si φ est l'angle entre $d\mathrm{H}$ et ds_1,

$$p = \frac{\mu\gamma_1 - \nu\beta_1}{\sin\varphi} \qquad q = \frac{\nu\alpha_1 - \lambda\gamma_1}{\sin\varphi} \qquad r = \frac{\lambda\beta_1 - \mu\alpha_1}{\sin\varphi}$$

ou, en remplaçant $\lambda\mu\nu$ par leurs valeurs

$$p = \frac{(n\alpha - l\gamma)\gamma_1 - (l\beta - m\alpha)\beta_1}{\sin\varphi\sin\theta} =$$
$$\frac{l(\alpha\alpha_1 + \beta\beta_1 + \gamma\gamma_1) - \alpha(l\alpha_1 + m\beta_1 + n\gamma_1)}{\sin\varphi\sin\theta}$$

$$p = \frac{l\cos\varepsilon - \alpha\cos\theta_1}{\sin\varphi\sin\theta} \qquad q = \frac{m\cos\varepsilon - \beta\cos\theta_1}{\sin\varphi\sin\theta}$$

$$r = \frac{n\cos\varepsilon - \gamma\cos\theta_1}{\sin\varphi\sin\theta}$$

Digitized by Google

Mais on a

$$p^2 + q^2 + r^2 = 1$$

c'est-à-dire

$$(l^2 + m^2 + n^2) \cos^2 \varepsilon + (\alpha^2 + \beta^2 + \gamma^2) \cos^2 \theta_1 - 2 \cos \varepsilon \cos \theta_1 (\alpha l + \beta m + \gamma n) = \sin^2 \varphi \sin^2 \theta$$

ou

$$\sin \varphi \sin \theta = \sqrt{\cos^2 \varepsilon + \cos^2 \theta_1 - 2 \cos \varepsilon \cos \theta \cos \theta_1}$$

Or,

$$d\mathrm{H} = \frac{i\,ds \sin \theta}{\varsigma^2}.$$

et

$$d\mathrm{F} = d\mathrm{H}\, i_1\, ds_1 \sin \varphi.$$

Il vient donc

$$d\mathrm{F} = \frac{i\, i_1\, ds\, ds_1}{\varsigma^2} \sin \theta \sin \varphi = \frac{i\, i_1\, ds\, ds_1}{\varsigma^2} \sqrt{\cos^2 \varepsilon + \cos^2 \theta_1 - 2 \cos \varepsilon \cos \theta \cos \theta_1}$$

On obtiendra de même, pour l'effort mécanique $d\mathrm{F}_1$ exercé par di_1 sur di, l'expression

$$d\mathrm{F}_1 = \frac{i\, i_1\, ds\, ds_1}{\varsigma^2} \sqrt{\cos^2 \varepsilon + \cos^2 \theta - 2 \cos \varepsilon \cos \theta \cos \theta_1}$$

et sa direction sera donnée par

$$p_1 = \frac{-l \cos \varepsilon + \alpha_1 \cos \theta}{\sin \varphi_1 \sin \theta_1} \qquad q_1 = \ldots\ldots \qquad r_1 = \ldots.$$

En général, $d\mathrm{F}$ et $d\mathrm{F}_1$ seront différents en grandeur et en direction.

Ils seront égaux en grandeur si $\cos \theta = \cos \theta_1$.

Remarques. — 1°) Considérons une direction π $(\xi \mu \zeta)$ perpendiculaire à ds et à ds_1, définie par

$$\xi = \frac{\beta \gamma_1 - \gamma \beta_1}{\sin \varepsilon} \qquad \eta = \frac{\gamma \alpha_1 - \eta \gamma_1}{\sin \varepsilon} \qquad \zeta = \frac{\alpha \beta_1 - \beta \alpha_1}{\sin \varepsilon}$$

Digitized by Google

Si ψ est l'angle entre φ et π, on a :

$$\cos\psi = l\,\xi + m\,\eta + n\,\zeta = \frac{l\,(\beta\,\gamma_1 - \gamma\,\beta_1) + \ldots + \ldots}{\sin\varepsilon} =$$

$$\frac{(m\,\gamma - n\,\beta)\,\alpha_1 + \ldots + \ldots}{\sin\varepsilon}.$$

D'ailleurs,

$$\cos\varphi = \lambda\,\alpha_1 + \mu\,\beta_1 + \nu\,\gamma_1 = \frac{(m\,\gamma - n\,\beta)\,\alpha_1 + \ldots + \ldots}{\sin\theta}$$

Par conséquent,

$$\cos\psi\,\sin\varepsilon = \cos\varphi\,\sin\theta = -\cos\varphi_1\,\sin\theta_1.$$

2°) La loi d'Ampère, basée sur l'hypothèse que les efforts $d\mathrm{F}$ et $d\mathrm{F}_1$ sont égaux et directement opposés, donne

$$d\,\mathrm{F} = d\,\mathrm{F}_1 = \cos\varepsilon - \frac{3}{2}\cos\theta\,\cos\theta_1$$

$$p = -p_1 = -l \qquad q = -q_1 = -m \qquad r = -r_1 = -n$$

Cette loi est incompatible avec les relations élémentaires définissant $d\,\mathrm{H}$ et $d\mathrm{F}$, telles qu'elles sont exprimées dans la théorie précédente.

3. Extension des lemmes de Kirchhoff au régime variable.

1. Soit un réseau comprenant α nœuds ; β branches sans condensateurs, et un certain nombre de branches avec condensateurs, les branches contenant ou non des forces électromotrices.

Supposons connu l'état électrique du réseau à l'époque $t = o$; cet état résultant le plus souvent d'un régime établi dans le réseau souvent modifié par l'ouverture ou la fermeture de certains commutateurs ; il se détermine par l'application des lemmes de Kirchhoff.

A partir du temps $t = o$, nous ne modifions plus rien

Digitized by Google

du réseau. Soit, pour $t = \infty$, I le courant de régime dans une des β branches ne renfermant pas de condensateur ; $(I + i)$ le courant au temps $t = t$; Q_0 et Q les charges d'un condensateur aux temps $t = o$ et $t = \infty$; $q = \int_0^\infty i dt$. Les I, les potentiels V des nœuds et par conséquent les charges Q des condensateurs s'obtiennent par l'application des lemmes de Kirchhoff. On aura, avec les conventions ordinaires de signes, en un nœud,

$$\Sigma \int_0^\infty (1 + i)\, dt = - \Sigma (Q - Q_0)$$

et comme

$$\Sigma I = o$$

il vient

$$\Sigma q = - \Sigma (Q - Q_0). \qquad (1)$$

Nous pourrons écrire, en nous plaçant en $(\alpha - 1)$ des nœuds, $(\alpha - 1)$ équations de la forme (1), distinctes.

Considérons maintenant une des $(\beta - \alpha + 1)$ boucles distinctes que l'on peut constituer avec les β branches ne contenant pas de condensateurs ; soit $\mathfrak{N}$ le flux d'induction magnétique embrassé positivement par une des branches, dans le sens positif du parcours (règle du tire-bouchon) ; r la résistance d'une branche ; E la force électromotrice constante appliquée dans cette branche ; on aura, dans la boucle, avec les conventions de signes ordinaires,

$$\Sigma E = \Sigma (1 + i)\, r + \Sigma \frac{d\mathfrak{N}}{dt}$$

Mais

$$\Sigma E = \Sigma I r$$

donc

$$o = \Sigma i r + \Sigma \frac{d\mathfrak{N}}{dt}$$

ou, en intégrant de $t = o$ à $t = \infty$,

$$o = \Sigma q r + \Sigma (\mathfrak{N} - \mathfrak{N}_0).$$

Digitized by Google

Posons, pour une branche parcourue aux limites du temps par I_0 et I et soumise à l'induction mutuelle de courants $I' + i'$:

$$\mathfrak{N} - \mathfrak{N}_0 = \mathcal{L}(I - I_0) + \Sigma\, \mathfrak{M}\,(I' - I'_0)$$

ou,

$$\mathfrak{N} - \mathfrak{N}_0 = \mathcal{L}\,\Delta I + \Sigma\, \mathfrak{M}\,\Delta I'$$

$\mathcal{L}$ et $\mathfrak{M}$ étant des coefficients de self-induction et d'induction mutuelle. Il vient pour la boucle :

$$\Sigma\, q r = -\Sigma\,(\mathcal{L}\,\Delta I + \Sigma\, \mathfrak{M}\,\Delta I') \qquad (2)$$

On pourra écrire $(\beta - \alpha + 1)$ équations distinctes de la forme (2) qui, jointes aux $(\alpha - 1)$ équations (1), donneront les β inconnues q.

2. Assimilons les q à des courants ; les $-(\mathcal{L}\,\Delta I + \Sigma\, \mathfrak{M}\,\Delta I')$ à des forces électromotrices. On voit que les équations (1) sont les équations ordinaires de Kirchhoff, appliquées au réseau dépourvu des branches avec con-

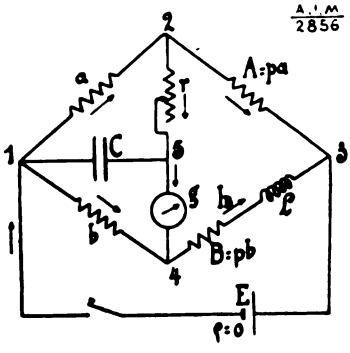


Fig. 3.

densateurs, mais *les nœuds reliés aux condensateurs sont alimentés, positivement ou négativement, par des courants* $-\Sigma\,(Q - Q_0)$ *venant de l'extérieur* et où les *branches con-*

Digitized by Google

tiennent des forces électromotrices — $(\mathcal{L}\,\Delta I + \Sigma\,\mathfrak{M}\,\Delta I')$, *leurs résistances n'étant pas modifiées et toutes les forces électromotrices* E *étant supprimées.*

Cette remarque permet, même dans des cas assez compliqués, de poser en se jouant les équations du système.

3. En voici un seul exemple. Considérons (voir fig. 3) la méthode d'Anderson pour la comparaison d'une capacité avec un coefficient de self-induction. On commence par établir l'équilibre permanent du galvanomètre, ce qui exige $A/a = B/b = p$, puis on règle r jusqu'à ce que la manœuvre de la clef de pile ne produise plus d'élongation balistique dans le galvanomètre. Soit, avant le temps $t = o$, la clef ouverte; Q_0 du condensateur $= o$, ainsi que tous les I_0 nuls. A l'époque $t = o$, fermons la clef. Négligeons la résistance ς de la pile. Le système va tendre vers un régime tel que

$$I_b = I_B = \frac{E}{b\,(1+p)} = \Delta\, I_B \tag{3}$$

$$V_3 = o \qquad V_1 = E \qquad V_2 = V_4 = V_5 = \frac{Ep}{1+p}$$

donc

$$Q = C\,(V_1 - V_5) = C\,E\,\frac{1}{1+p} \tag{4}$$

Puis appliquons la remarque du n° 2 au réseau de la figure 4, dépourvu de condensateur mais alimenté en 1 et 5.

On aura, puisque q_g doit être nul, grâce au réglage de r, au nœud 1 :

$$q_i = q_a + q_b + Q.$$

Au nœud 5 :

$$q_r = -Q.$$

Au nœud 2 :

$$q_A = q_a - q_r = q_a + Q.$$

Digitized by Google

Au nœud 4 :

$$q_B = q_b.$$

Ces valeurs de q_5, q_r, q_A et q_B ont été inscrites sur la figure 4.

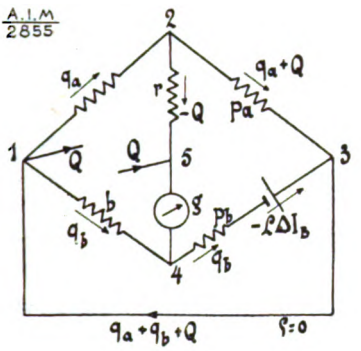


Fig. 4.

Appliquons maintenant (fig. 4) l'équation (2) aux boucles 1251, 23452, ρ 123 ρ, le réseau fictif ne comprenant qu'une seule force électromotrice égale à $-\mathcal{L}\Delta I_B$ dans la branche 43. Nous obtenons :

$$aq_a - rQ - bq_b = o$$
$$pa(q_a + Q) - pbq_b + rQ = \mathcal{L}\Delta I_B$$
$$aq_a + pa(q_a + Q) = o.$$

La troisième équation donne :

$$q_a = -\frac{Qp}{1+p}$$

puis la première équation :

$$bq_b = Q\left[-a\frac{p}{1+p} - r\right].$$

Ces valeurs, substituées dans la seconde, donnent la condition d'équilibre cherchée :

$$\frac{\mathcal{L}\Delta I_B}{Q} = pa + (p+1)r$$

Digitized by Google

ou, d'après (3) et (4) :

$$\mathcal{L} = C\,b\,[pa + (p+1)\,r] = C\,[b\,A + r\,(b + B)].$$

4. Sur la pression latérale des tubes de force.

1. On montre très aisément, par des considérations élémentaires, l'existence d'une tension longitudinale des tubes de force dans un champ électrostatique ; et que, si ε est la constante diélectrique du milieu, H l'intensité de champ, cette tension est, par unité de section,

$$P = \frac{\varepsilon H^2}{8\pi}$$

Maxwell, en partant des équations générales de l'équilibre élastique, a montré non seulement l'existence de ces tensions, mais aussi celle de pressions latérales ; il s'est basé à cet effet sur des théorèmes généraux. Il m'a paru que l'on pouvait éviter l'emploi de ces derniers et rendre ainsi plus accessible la démonstration de cet important principe.

2. Soit V le potentiel, H l'intensité de champ ; prenons trois axes rectangulaires x, y, z. On sait que

$$H_x = -\frac{dV}{dx} \qquad H_y = -\frac{dV}{dy} \qquad H_z = -\frac{dV}{dz}$$

et

$$\frac{d\,H_x}{dy} = \frac{d\,H_y}{dx} \qquad \frac{d\,H_y}{dz} = \frac{d\,H_z}{dy} \qquad \frac{d\,H_z}{dx} = \frac{d\,H_x}{dz} \qquad (1)$$

Désignons par l, m, n les cosinus directeurs de H :

$$l = \frac{H_x}{H} \qquad m = \frac{H_y}{H} \qquad n = \frac{H_z}{H}.$$

En écrivant que, en vertu du théorème de Gauss, le flux de force sortant d'un parallélipède élémentaire, ne

Digitized by Google

contenant aucune charge, est nul, on obtient l'équation de continuité du flux

$$\frac{d\,H_x}{dx} + \frac{d\,H_y}{dy} + \frac{d\,H_z}{dz} = 0 \qquad (2)$$

Admettons qu'il existe le long d'un tube de force une tension longitudinale

$$P = \frac{\varepsilon\,H^2}{8\,\pi}$$

par unité de section. On aura

$$P_x = l\,P \qquad P_y = m\,P \qquad P_z = n\,P. \qquad (3)$$

3. Appliquons sur la surface latérale du tube une pression normale P′ par unité de surface et soit $(l'\ m'\ n')$ la direction de cette pression. On aura

$$ll' + mm' + nn' = 0 \qquad (4)$$

$$P'_x = l'\,P' \qquad P'_y = m'\,P' \qquad P'_z = n'\,P' \qquad (5)$$

La direction $(l''\ m''\ n'')$ perpendiculaire commune à $(l\ m\ n)$ $(l'\ m'\ n')$ est définie par

$$l'' = mn' - nm' \qquad m'' = nl' - ln' \qquad n'' = lm' - ml'$$

et on a, d'ailleurs,

$$ln + l'n' + l''n'' = 0$$
$$ml + m'l' + m''n'' = 0$$
$$nm + n'm' + n''m' = 0.$$

Je dis que l'équilibre élastique sera satisfait par les pressions P′ combinées avec les tensions P, si P′ = P.

4. Pour cela, substituons ces efforts dans les équations générales de l'équilibre ; si $N_1\ N_2\ N_3$ sont les tensions élastiques suivant les axes coordonnées et $T_1\ T_2\ T_3$ les tensions tangentielles élastiques, le *premier système* d'équations de l'équilibre donne :

$$(A)\quad \left\{\begin{aligned} Pl &= lN_1 + mT_3 + nT_2 \\ Pm &= lT_3 + mN_2 + nT_1 \\ Pn &= lT_2 + mT_1 + nN_3 \end{aligned}\right.$$

Digitized by Google

$$(A') \quad \begin{cases} -P l' = l' N_1 + m' T_3 + n' T_2 \\ -P m' = l' T_3 + m' N_2 + n' T_1 \\ -P n' = l' T_2 + m' T_1 + n' N_3 \end{cases}$$

Nous allons en déduire les valeurs des T et des N.
(A) peut s'écrire :

$$\begin{cases} N_1 = P - \frac{m}{l} T_3 - \frac{n}{l} T_2 \\ N_2 = P - \frac{l}{m} T_3 - \frac{n}{m} T_1 \\ N_3 = P - \frac{l}{n} T_2 - \frac{m}{n} T_1 \end{cases} \qquad (6)$$

Substituons (6) dans (A'). Il vient :

$$\begin{cases} -P l' = P l' + \left(m' - \frac{l'}{l} m\right) T_3 + \left(n' - \frac{l'}{l} n\right) T_2 \\ \qquad\qquad\qquad\qquad \text{»} \\ \qquad\qquad\qquad\qquad \text{»} \end{cases}$$

ou

$$\begin{cases} \qquad\qquad m'' T_2 - n'' T_3 = 2 P l l' \\ -l'' T_1 \qquad\quad + n'' T_3 = 2 P m m' \\ \quad l'' T_1 - m'' T_2 \qquad\quad = 2 P n n' \end{cases} \qquad (7)$$

En faisant la somme des trois équations (7), on trouve l'identité $o = o$; deux des équations (7) seulement sont distinctes ; ce système est donc indéterminé. Pour lever l'indétermination, remarquons que $(l' \; m' \; n')$ est une direction perpendiculaire quelconque à $(l \; m \; n)$; nous pourrons y substituer la direction $(l'' \; m'' \; n'')$ à la condition de remplacer aussi $(l'' \; m'' \; n'')$ par $(-l' - m' - n')$ qui joue vis-à-vis de $(l \; m \; n, \; l'' \; m'' \; n'')$ le même rôle que $(l'' \; m'' \; n'')$ vis-à-vis de $(l \; m \; n, \; l' \; m' \; n')$. Le système (7) devient :

Digitized by Google

$$\left\{\begin{array}{lll} & -m' T_2 + n' T_3 = 2 P l l'' & \\ l' T_1 & -n' T_3 = 2 P m m'' & (7') \\ -l' T_1 + m' T_2 & = 2 P n n'' & \end{array}\right.$$

système qui se réduit aussi à deux équations distinctes.

En combinant les premières équations des groupes (7) et (7') on obtient

$$\left.\begin{array}{l} T_2 = \dfrac{2 P l (l' n' + l'' n'')}{-l} = 2 P l n \\ T_3 \qquad\qquad\qquad\qquad = 2 P m l \\ \text{On trouverait de même} \\ T_1 = 2 P n m \end{array}\right\} \quad (8)$$

Les six équations (7) et (7') dont quatre sont distinctes se ramènent donc au système (8), c'est-à-dire qu'elles sont compatibles entre elles et déterminées.

Les équations (6), en y substituant (8), donnent alors :

$$N_1 = P - \frac{m}{l} 2 P m l - \frac{n}{l} 2 P l n = P [1 - 2 (m^2 + n^2)]$$

ou

$$\left\{\begin{array}{l} N_1 = P [2 l^2 - 1] \\ N_2 = P [2 m^2 - 1] \\ N_3 = P [2 n^2 - 1] \end{array}\right. \quad (9)$$

Les systèmes (8) et (9) peuvent du reste s'écrire, d'après (3)

$$\left\{\begin{array}{l} T_1 = \dfrac{\varepsilon}{4\pi} H_y H_z \\ T_2 = \dfrac{\varepsilon}{4\pi} H_z H_x \\ T_3 = \dfrac{\varepsilon}{4\pi} H_x H_y \end{array}\right. \quad (I)$$

Digitized by Google

$$\left\{\begin{aligned} N_1 &= \frac{\varepsilon}{4\pi}\left(H_x^2 - \frac{1}{2}H^2\right) \\ N_2 &= \frac{\varepsilon}{4\pi}\left(H_y^2 - \frac{1}{2}H^2\right) \\ N_3 &= \frac{\varepsilon}{4\pi}\left(H_z^2 - \frac{1}{2}H^2\right) \end{aligned}\right. \qquad \text{(II)}$$

5. Il ne reste plus qu'à vérifier que les solutions (I) et (II) satisfont au *second système* d'équations de l'équilibre élastique :

$$\text{(B)} \quad \left\{\begin{aligned} &\frac{dN_1}{dx} + \frac{dT_3}{dy} + \frac{dT_2}{dz} + X = o \\ &\frac{dT_3}{dx} + \frac{dN_2}{dy} + \frac{dT_1}{dz} + Y = o \\ &\frac{dT_2}{dx} + \frac{dT_1}{dy} + \frac{dN_3}{dz} + Z = o \end{aligned}\right.$$

où (X Y Z) représentent les efforts extérieurs que nous supposerons nuls : $X = Y = Z = o$.

La première équation (B) devient, en y substituant (I) et (II).

$$H_x\left(\frac{dH_x}{dx} + \frac{dH_y}{dy} + \frac{dH_z}{dz}\right) +$$
$$\left(H_x\frac{dH_x}{dx} + H_y\frac{dH_x}{dy} + H_z\frac{dH_x}{dz}\right) - H\frac{dH}{dx} = o.$$

Mais

$$H\frac{dH}{dx} = H_x\frac{dH_x}{dx} + H_y\frac{dH_y}{dy} + H_z\frac{dH_z}{dz}$$

Il vient donc, compte tenu de (2),

$$H_y\left(\frac{dH_x}{dy} - \frac{dH_y}{dx}\right) + H_z\left(\frac{dH_x}{dz} - \frac{dH_z}{dx}\right) = o$$

ce qui est exact, d'après (1).

Digitized by Google

On démontrerait de même que les deux dernières équations (B) sont satisfaites.

6. Donc, le système (I) et (II) satisfait aux deux systèmes d'équations (A) et (B) de l'équilibre élastique; or, il équivaut aux pressions et aux tensions P; celles-ci assurent donc l'équilibre.

5. La fonction de court-circuit dans les machines a collecteur.

1. Soit (fig. 5) un enroulement $2p$ polaire, en série, en dérivation, ou mixte, comprenant n bobines et relié à un collecteur à n lames sur lequel sont disposés $2p$ balais,

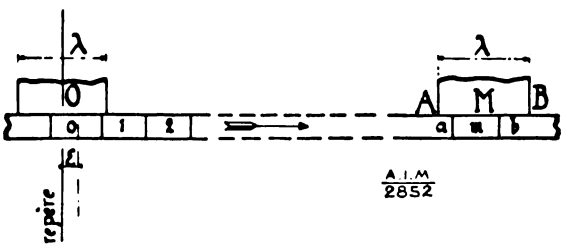


Fig. 5.

chacun ayant une largeur égale à λ fois la largeur d'une lame. Faisons abstraction de l'épaisseur de l'isolant entre lames.

Numérotons les lames 0 1 2 ... m ... $(n - 1)$ dans le sens de la rotation et les balais 0 1 2 ... M ... $(2p - 1)$ dans le même sens.

Prenons comme unité d'angle la largeur d'une lame, soit $2\pi/n$. La distance d'axe en axe de deux balais consécutifs sera alors

$$\frac{2\pi}{2p} : \frac{2\pi}{n} = \frac{n}{2p}$$

Digitized by Google

Choisissons comme repère l'axe du balai O ; comptons les angles positivement dans le sens de la marche, soit de gauche à droite ; soit, enfin, ε la position de l'axe de la lame O au moment considéré.

Les arêtes A et B du balai M ont, comme angle de position, respectivement

$$A = M\frac{n}{2p} - \frac{\lambda}{2} \qquad B = M\frac{n}{2p} + \frac{\lambda}{2}$$

et les arêtes a et b de la lame m :

$$a = \varepsilon + m - \frac{1}{2} \qquad b = \varepsilon + m + \frac{1}{2}.$$

2. La lame m sera en contact avec le balai M si b est à droite de A, en même temps que a est à gauche de B, c'est-à-dire si

$$b > A \quad \text{et} \quad a < B$$

ou

$$\varepsilon + m + \frac{1}{2} > M\frac{n}{2p} - \frac{\lambda}{2} \quad \text{et} \quad \varepsilon + m - \frac{1}{2} < M\frac{n}{2p} + \frac{\lambda}{2}$$

ou encore

$$M\frac{n}{2p} - \varepsilon + \frac{\lambda + 1}{2} > m > M\frac{n}{2p} - \varepsilon - \frac{\lambda + 1}{2} \qquad (1)$$

3. La lame m sera entièrement couverte par le balai M (cas de la fig. 5) si, outre la condition (1), on a

$$a \geqslant A \quad \text{et} \quad b \leqslant B$$

ou

$$\varepsilon + m - \frac{1}{2} \geqslant M\frac{n}{2p} - \frac{\lambda}{2} \quad \text{et} \quad \varepsilon + m + \frac{1}{2} \leqslant M\frac{n}{2p} + \frac{\lambda}{2}$$

ou encore

$$M\frac{n}{2p} - \varepsilon + \frac{\lambda - 1}{2} \geqslant m \geqslant M\frac{n}{2p} - \varepsilon - \frac{\lambda - 1}{2} \qquad (2)$$

ce qui exige naturellement $\lambda \geqslant 1$.

Digitized by Google

4. La lame m ne sera que partiellement couverte par le balai si (1) est réalisé sans que (2) le soit. Le contact se fera sur la région droite de la lame (fig. 6) si

$$b > A$$

ou

$$\varepsilon + m + \frac{1}{2} > M \frac{n}{2p} - \frac{\lambda}{2}$$

ou encore

$$m > M \frac{n}{2p} - \varepsilon - \frac{\lambda + 1}{2} \qquad (3)$$

et l'étendue de la partie couverte est

$$b - A = m - \left[M \frac{n}{2p} - \varepsilon - \frac{\lambda + 1}{2} \right] \qquad (4)$$

A.I.M. 2853

Fig. 6.

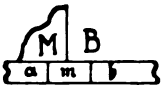


Fig. 7.

Au contraire (fig. 7) le contact se fera sur la région gauche de la lame si

$$a < B$$

ou

$$\varepsilon + m - \frac{1}{2} < M \frac{n}{2p} + \frac{\lambda}{2}$$

ou encore

$$m < M \frac{n}{2p} - \varepsilon + \frac{\lambda + 1}{2} \qquad (5)$$

et l'étendue de la partie couverte est

$$B - a = \left[M \frac{n}{2p} - \varepsilon + \frac{\lambda + 1}{2} \right] - m \qquad (6)$$

Bien entendu, les conditions (1) et (2) doivent en outre être satisfaites.

Digitized by Google

5. L'axe de lame m coincidera avec l'axe du balai M quand ε sera tel que

$$\left.\begin{aligned} \varepsilon + m &= \mathrm{M}\,\frac{n}{2p} \\ \text{ou} \qquad \varepsilon &= \mathrm{M}\,\frac{n}{2p} - m \end{aligned}\right\} \qquad (7)$$

La période du phénomène est évidemment la durée du passage d'une lame sous la ligne de repère. Nous pouvons donc nous en tenir aux valeurs de ε positives et comprises entre 1 et zéro, cette dernière valeur étant exclue.

On voit, d'après (7), que m est la partie entière du nombre, entier ou fractionnaire, M $n/2p$, et que la valeur correspondante de ε est la partie fractionnaire de M $n/2p$, ou l'unité si M $n/2p$ est entier.

Si n est multiple de $2p$, c'est-à-dire si le nombre de lames est multiple exact du nombre des balais, la coïncidence surviendra simultanement sous tous les balais.

6. Il est au surplus facile de trouver quelle bobine, *comptée dans l'enroulement*, est reliée à la lame m. Soit, en effet, y le pas de l'enroulement ; les bobines consécutives de l'enroulement comptées à partir de la bobine reliée à la lame o, seront reliées aux lames $o, y, 2y \ldots, \mu y \ldots$; la lame μy ne différera du reste pas de la lame m si μy ne diffère de m que d'un multiple qn du nombre total n des lames, q étant, bien entendu, entier. On a donc simplement à résoudre en nombres entiers l'équation indéterminée

$$\mu y = m + qn$$

ou

$$y\mu - nq = m$$

dans laquelle y, n, m sont donnés ; y est du reste premier avec n si l'enroulement ne se ferme qu'une fois ; μ et q sont les inconnues ; on choisira naturellement la plus petite valeur entière de μ.

Digitized by Google

Le plus simple sera d'exprimer la fraction y/n en fraction continue ; soit R/S l'avant-dernière réduite, dont le rang est t. On aura une solution en posant

$$\mu = (-1)^{t+1} S m \qquad q = (-1)^{t+1} R m. \qquad (8)$$

On obtiendra ensuite la plus petite valeur positive de μ en ajoutant à la valeur (8) ci-dessus ou en en retranchant un nombre entier de fois n.

7. Donnons un exemple numérique choisi à dessein, très simple, de l'application de ces diverses remarques. Soit

$$p = 3 ; \quad n = 17 ; \quad \lambda = 1.$$

Il vient

$$\frac{n}{2p} = \frac{17}{6} = 2\frac{5}{6}$$

1°) Quelles seront, au moment $\varepsilon = o$, les lames en contact avec les balais ? La formule (1) donne :

$$\frac{17}{6} M + 1 \geqslant m \geqslant \frac{17}{6} M - 1$$

En faisant successivement M = 0, 1, 2, 3, 4, 5, on obtient

$$M\frac{n}{2p} = o ; \quad 2\frac{5}{6} ; \quad 5\frac{4}{6} ; \quad 8\frac{3}{6} ; \quad 12\frac{2}{6} ; \quad 14\frac{1}{6}$$

et, par suite :

Digitized by Google

M	> m >		m
0	1	— 1	0
1	$3\frac{5}{6}$	$1\frac{5}{6}$	2,3
2	$6\frac{4}{6}$	$4\frac{4}{6}$	5,6
3	$9\frac{3}{6}$	$7\frac{3}{6}$	8,9
4	$12\frac{2}{6}$	$10\frac{2}{6}$	11,12
5	$15\frac{1}{6}$	$13\frac{1}{6}$	14,15

2°) Quelles seront à cet instant les étendues de lame couvertes par les balais ?

En appliquant les formules (4) et (6) respectivement aux lames 2, 5, 8, 11, 14 et 3, 6, 9, 12, 15, on trouve comme surfaces couvertes :

$$\frac{1}{6} \quad \frac{2}{6} \quad \frac{3}{6} \quad \frac{4}{6} \quad \frac{5}{6}$$

et, naturellement, les valeurs complémentaires.

3°) Pour quelles valeurs de $0 \leqq \varepsilon < 1$, y aura-t-il coïncidence entre les axes 0, 1, 2 ... et l'axe d'une lame ; quelle sera cette lame ?

Pour M = 0, 1, 2, 3, 4, 5, les valeurs entières de M $n/2p$, c'est-à-dire les numéros des lames en coïncidence avec ces balais seront, d'après (7), 0. 2, 5, 8, 12, 14. Les coïncidences se produiront à des moments correspondant à l'égalité entre ε et l'unité ou la partie fractionnaire de M $n/2p$, soit donc $\varepsilon = 5/6, 4/6, 3/6, 2/6, 1/6$, les coïncidences se succèdent donc régulièrement dans le temps.

Digitized by Google

4°) Quelle sera la bobine, comptée dans l'enroulement, en relation avec la lame 9 du collecteur ?

Admettons que le pas de l'enroulement y soit égal à 5, ce qui correspond à quatre circuits en parallèle dans l'induit. On a

$$\frac{17}{5} = \cfrac{1}{3 + \cfrac{1}{2 + \cfrac{1}{2}}}$$

L'avant-dernière réduite est la seconde ($t = 2$) et elle est égale à $2/7 = R/S$.

Il vient

$$\mu = (-1)^2\, 7\, m$$

Pour $m = 9$; $\mu = 63 = 3 \times 17 + 12$; la bobine cherchée est à 12e comptée dans l'enroulement.

8. Ces formules présentent une utilité incontestable pour l'étude de la commutation, car elles donnent, de façon très simple, à un moment quelconque, la position des lames sous les balais.

Oscar COLARD.

Digitized by Google

BIBLIOGRAPHIE.

537.82 (048) **La Téléphonie**, par E. PIERARD, Ingénieur, A. I. M., Ingénieur en chef Directeur de Service à l'Administration des Télégraphes belges ; *tome II : Appareils, commutateurs, tables Standards* (3e édition). — Paris, Dunod et Pinat ; Bruxelles, Ramlot, 1912.

La 3e édition du tome II de l'ouvrage bien connu de notre camarade M. E. Pierard ne pourra que confirmer l'excellente réputation dont il jouit auprès des spécialistes.

Désirant avant tout que son livre réflète l'état actuel de la technique téléphonique, l'auteur n'a pas craint d'élaguer certains paragraphes traitant plus particulièrement d'appareils assez intéressants au point de vue historique mais tombés en désuétude.

En décrivant les dispositifs d'usage courant, l'auteur a soin de faire un choix judicieux, évitant ainsi de donner à son travail l'aspect de catalogue d'une monographie sèche et décousue. Il ne prend en considération que des appareils présentant des particularités de nature à les distinguer réellement des constructions similaires tant à l'égard du principe qu'à celui de la réalisation pratique.

Signalons parmi les additions intéressantes de la présente édition : les nouveaux récepteurs et transmetteurs, les dispositifs de renforcement de la transmission et, enfin, la téléphonie à travers l'espace dont les procédés par ondes électromagnétiques font tant de progrès à l'heure actuelle.

Digitized by Google

MÉMOIRES

621.187.5

Courbes caractéristiques d'une chaudière.

SOMMAIRE : 1. Pour caractériser une chaudière donnée, il est utile de tracer les diagrammes de ses divers facteurs en fonction de ceux de ces facteurs qu'on peut regarder comme indépendants et dont ont peut couramment disposer. — 2. Mais pour qu'un tel programme ne soit pas illusoire, il faut se convaincre qu'un essai de vaporisation industrielle est susceptible de la même précision que tout autre essai de machine. — 3. Dans ce but, et pour fixer les notations, rappelons brièvement la marche d'un essai industriel de vaporisation.

1. — Pour caractériser un moteur, on ne se contente pas de revêtir d'un chiffre certains facteurs, tels que ceux — vitesse angulaire, couple et puissance utile, rendement... — qui intéressent en dernière analyse.

Et lorsqu'on dit par abréviation : moteur d'autant de chevaux, autant de tours par minute, tel rendement, on ne donne que des renseignements très incomplets, car étant fonction d'un certain nombre d'entre eux qu'on peut regarder comme indépendants, les divers facteurs qui caractérisent le moteur passent généralement par des valeurs très différentes suivant les valeurs mêmes de ces facteurs indépendants.

Aussi pour caractériser un moteur donné, trace-t-on les courbes des rendements, de la puissance utile ou indiquée, de la vitesse angulaire, du couple, etc., en supposant tour à tour constants, sauf un, les facteurs dont on peut disposer.

Digitized by Google

De même, dans une installation existante pour la production de vapeur, installation qui comprend essentiellement un foyer et les carneaux à la suite, cheminée comprise ; une chaudière avec, éventuellement, surchauffeur, économiseur ou réchauffeur ; et enfin un dispositif de tirage qui peut être constitué par la cheminée et un registre (tirage naturel) ou par un ventilateur à vitesse réglable, aspirant ou soufflant (1) (tirage forcé) etc.— il y a toujours un facteur indépendant au moins, c'est, pour ne citer que celui-là, « *l'allure* » ou « *rapidité de combustion* ».

Ce facteur s'exprime généralement par le *poids/temps* de combustible consommé (2).

Pour en disposer, il suffit de modifier l'ouverture du registre.

Ceci oblige déjà à se demander comment varieraient, en fonction de ce seul facteur indépendant, les autres facteurs tels que le *poids/temps de vapeur produite* (3), *le coefficient de vaporisation ou le rendement.*

Un autre facteur indépendant dont on peut couram-

(1) Le cas des chaudières alimentées directement par gaz de hauts fourneaux ou de fours à coke rentre en somme dans le cas du ventilateur soufflant.

(2) C'est-à-dire « *Poids de combustible consommé par unité de temps* ». La première forme d'expression nous paraît, entre autres avantages, avoir plus de concision que la seconde.

Si nous devions définir une vitesse angulaire, nous dirions donc angle/temps décrit par le mobile.

Lorsqu'il s'agit d'un combustible solide, on exprime souvent la rapidité de combustion par le *poids/temps* × *surface de grille* de combustible consommé. Par exemple, on dira « *allure de 78 kilog. de charbon par heure et mètre carré de surface de grille* ».

(3) *Poids/temps* ramené à de l'eau prise liquide à 0 degré centigrade et transformée en vapeur saturée à la pression absolue de 6 atmosphères.

Dans le but de rendre ce facteur comparable d'une chaudière à une autre, on exprime souvent le *poids/temps : surface de chauffe* de vapeur produite, et on dira par exemple : *une vaporisation de 15 kilog. par heure et mètre carré de surface de chauffe.*

Digitized by Google

ment disposer dans toute installation existante, c'est la « *qualité* » du combustible. Par exemple, s'il s'agit de charbon, celui-ci pourra être plus ou moins gras, plus ou moins cendreux.

En traçant expérimentalement les courbes caractéristiques de la chaudière, c'est-à-dire les graphiques du rendement, du poids/temps de vapeur produite, etc., en fonction de l'allure, et pour les diverses qualités de combustibles qu'on pourrait employer, on aura sous une forme condensée et expressive un ensemble d'éléments capables de donner les indications les plus diverses et les plus utiles pour l'installation qu'on possède.

Par exemple :

Si l'on veut passer un marché de combustibles, on saura, d'après le prix des diverses catégories, quelle est la solution la plus économique : on saura à quel pourcentage de cendres on ne doit pas descendre pour un charbon de nature donnée, sous peine de ne pouvoir satisfaire à la demande de vapeur. On évitera ainsi de graves ennuis dont les fournisseurs ne sont pas toujours responsables, attendu que l'industriel ou l'ingénieur doit être le premier à connaître ses chaudières.

Même si on ne se propose pas de choisir rapidement selon les tarifs du moment les catégories de combustibles les mieux appropriées, les courbes caractéristiques auront déjà l'avantage notable de renseigner exactement sur le travail de la chaudière, chose sur laquelle on s'illusionne facilement si on adopte pour ce travail un chiffre de rendement uniforme.

Nous croyons avoir esquissé assez nettement ce que nous entendons par « *courbes caractéristiques* » d'une chaudière, et ce à quoi elles doivent servir.

Nous n'envisageons, dans cette étude, que la connaissance d'une installation existante, dans le but d'obtenir

Digitized by Google

de cette installation même imparfaite le maximum de ce qu'elle peut donner.

Nous ne nous proposons donc nullement d'énumérer les moyens propres à améliorer l'état de la chaudière.

Mais il est bien évident que le tracé des courbes caractérisées pour divers types de chaudières, contribuerait à indiquer la valeur de telle ou telle modification.

Au surplus, nous croyons inutile d'insister sur l'économie énorme — et si aisée à réaliser — que peut donner une conduite rationnelle de la chaudière.

2. — Avant d'aller plus loin, il faudra que nous fixions nos idées sur ce phénomène complexe qu'est, d'une part, la combustion dans le foyer et les carneaux et, d'autre part, l'échauffement, puis la vaporisation de l'eau dans la chaudière et les appareils annexes.

Cette nécessité consiste, en somme, à pouvoir disposer de notations précises et invariables pour désigner les facteurs en présence.

Pour cela, nous ne pourrions mieux faire que de résumer la marche d'un essai de vaporisation.

Le lecteur même auquel la question ne serait pas familière en retirera, nous l'espérons, la certitude qu'un essai de vaporisation industrielle est susceptible d'une précision aussi poussée que tout autre essai de machine.

A cet égard, il ne pourrait subsister qu'une incertitude : celle qui résulte de la « part du chauffeur ». Celle-ci n'est-elle pas prépondérante ?

L'objection est solutionnée par l'expérience.

Tout d'abord, elle ne se soulève guère que dans le cas d'un combustible solide à jeter à la pelle dans le foyer. Car s'il s'agit d'un combustible gazeux ou liquide, ou même s'il s'agit d'un combustible solide réparti par distributeur mécanique, la part du chauffeur est à peu près annulée.

Digitized by Google

Mais venons-en à la part que peut avoir le chauffeur dans un essai de vaporisation où le combustible est jeté à la pelle sur la grille. Cette part est, en effet, prépondérante, en ce sens qu'on peut chauffer aussi mal qu'on le veut, et il est certain qu'un chauffeur maladroit, ou intéressé, pourra dénaturer complètement les résultats d'un essai. Mais, réciproquement, un chauffeur qui connaît son métier et sa chaudière, dès qu'il aura pris connaissance de son charbon à l'allure qu'on veut lui imposer, ce chauffeur obtiendra toujours les mêmes résultats : pour prendre un exemple, la part d'erreur qui lui est imputable dans la détermination du coefficient de vaporisation [1] ne dépassera pas un demi pour cent de la valeur de ce dernier.

Il faut des instruments précis pour que la part d'erreur qui revient au mesurage de l'eau d'alimentation (poids et température) n'atteigne pas cette valeur.

Si un chauffeur instruit et soigneux « chauffe toujours de la même manière », c'est tout simplement qu'il fait donner au charbon son maximum de rendement, pour la chaudière et l'allure considérées.

En résumé, on pourrait dire que « la part du chauffeur » est une propriété nuisible qui est toujours voisine de zéro chez les bons chauffeurs qu'on ne prend pas au dépourvu.

La définition du « bon chauffeur », si elle n'était inutile, demanderait un développement assez long, car elle sup-

(1) Le coefficient de vaporisation est le poids de vapeur-type produite/poids de combustible consommé. Lorsqu'il s'agit d'un combustible cendreux comme le charbon, on distingue le coefficient de vaporisation brute qu'on exprime habituellement par le nombre de kilogrammes de vapeur type produits par kilogramme de charbon, et le coefficient de vaporisation nette, ou le nombre de kilogrammes de vapeur type correspondant, selon le facteur précédent, à un kilogramme de charbon sec et pur.

C'est le premier qu'on mesure expérimentalement. On passe au second par simple proportionnalité.

Digitized by Google

pose des qualités qui ne s'acquièrent que par la pratique et des connaissances, ou du moins un jugement, qui n'est pas celui d'un manœuvre.

Cependant, puisque c'est dans la conduite de la combustion que la « part du chauffeur » trouverait à s'exercer pour plus des trois quarts, voyons brièvement quelques signes auxquels on peut la juger.

Le chauffeur doit espacer régulièrement ses charges de manière à maintenir la couche en ignition à une hauteur telle que son feu soit aussi brillant que possible ; ce critérium suppose, en effet, une quantité d'air qui, pour le foyer et l'allure considérés, donne la plus haute température et la meilleure combustion. Implicitement, ce critérium tient compte en somme de la fusibilité des cendres et de la propriété cokéfiante, de même que de la teneur en matière volatile.

Le chauffeur répartit, au surplus, son charbon uniformément sur la grille en évitant soigneusement les « trous » ; il espace aussi régulièrement ses crochetages, si le charbon fait coke, en évitant les « tâches » ; il ferme son registre chaque fois qu'il ouvre la porte du foyer, etc.

Ce qui précède suppose, bien entendu, une chaudière entretenue. Elle n'a pas besoin d'être neuve.

Pour l'ingénieur ou l'industriel, les précautions se réduisent à une initiation intelligente de son chauffeur et à une surveillance raisonnée (notamment par l'emploi d'appareils enregistreurs).

Bref, pour se mettre à l'abri de la « part du chauffeur », il suffit de prendre des précautions élémentaires, quoique trop souvent négligées, qui devraient appartenir à la pratique courante.

3. — Un essai industriel de vaporisation consiste essentiellement à brûler le combustible à une allure aussi

Digitized by Google

constante que possible, et à mesurer, dès que la chaudière est en régime [1], depuis un instant initial jusqu'à un instant final, le poids de combustibles consommé, d'une part, et d'autre part, la quantité de chaleur absorbée et utilisée à la vaporisation par la chaudière.

Le premier facteur, « le poids de combustible consommé », se détermine directement : par pesée s'il s'agit d'un combustible solide [2] ou liquide ; à l'aide d'un enregistreur de débit ou d'un gazomètre s'il s'agit d'un combustible gazeux.

La détermination du second facteur « la quantité de chaleur absorbée et utilisée à la vaporisation par la chaudière » fait seule l'objet d'une mesure indirecte assez complexe.

Comme les courbes caractéristiques que nous donnons ci-après ont été relevées sur une chaudière sans surchauffeur et que ce préambule tend surtout à rappeler clairement les divers facteurs que nous rencontrerons, les notations qui vont suivre concernent aussi le cas d'une chaudière sans surchauffeur.

Appelons à un instant t quelconque, au cours de l'essai :

(1) La chaudière doit être « en régime », c'est-à-dire que, outre l'allure, autrement dit le poids/temps de combustible consommé, la pression de la vapeur, la température de l'eau d'alimentation, etc., doivent avoir pris et doivent conserver des valeurs aussi constantes que possible.

En effet, pour que des essais soient comparables entre eux, il faut que les valeurs moyennes des divers facteurs soient à peu près identiques de l'un à l'autre essai et que ces facteurs ne varient pas trop de part et d'autre de leur valeur moyenne.

(2) Dans le cas d'un combustible solide, il faut tenir compte du combustible en ignition qui se trouve déjà sur la grille au moment initial, et de celui qui y reste après le décrassage final. On peut faire ces corrections par pesées également.

Digitized by Google

Q le poids d'eau dans la chaudière ;
Q' le poids total d'eau d'alimentation fournie depuis l'instant initial ;
P le poids total de vapeur formée depuis l'instant initial ;
q la chaleur/poids de l'eau de la chaudière (notation des tables de vapeur) ;
q' la chaleur/poids de l'eau qui entre dans la chaudière (notations des tables de vapeur) ;
λ la chaleur/poids de la vapeur (notations des tables de vapeur) ;
C la quantité de chaleur absorbée par la chaudière et utilisée à la vaporisation depuis l'instant initial.

Pendant l'intervalle de temps dt qui va suivre, un poids dQ' d'eau d'alimentation sera introduit dans la chaudière, le poids de liquide que celle-ci contient variera de dQ, et le poids total de vapeur formée de dP. On a :

$$dQ' = dP + dQ \tag{1}$$

et la quantité de chaleur dC absorbée et utilisée par la chaudière se compose des termes suivants :

$$\begin{aligned} dC &= \lambda \,.\, dP + q \,.\, dQ - q' \,.\, dQ' + Q \,.\, dq, \\ &= \lambda \,.\, dP - q' \,.\, dQ' + d\,(Qq). \end{aligned}$$

La quantité de chaleur utilisée à la vaporisation entre l'instant t_1 et l'instant t_2 est donc :

$$C = \int_{t_1}^{t_2} \lambda \,.\, dP - \int_{t_1}^{t_2} q' \,.\, dQ' + (Q_2\, q_2 - Q_1\, q_1)$$

et en remplaçant, en vertu de (1), P par $Q' + Q_1 - Q_2$, il viendra finalement :

$$C = Q'\,(\lambda_m - q'_m) + (Q_2\, q_2 - Q_1\, q_1 - \overline{Q_2 - Q_1}\,\lambda_m) \tag{3}$$

les valeurs « moyennes » λ_m et q'_m étant définies par les formules :

Digitized by Google

$$\left.\begin{aligned} \lambda_m &= \frac{\int_{t_1}^{t_2} \lambda \,.\, dP}{P} \\ q'_m &= \frac{\int_{t_1}^{t_2} q' \,.\, dQ'}{Q'} \end{aligned}\right\} \qquad (2)$$

Comment calcule-t-on les facteurs qui entrent dans la formule (3) ?

I. Q' le poids d'eau d'alimentation fourni à la chaudière pendant la durée de l'essai s'obtient très simplement par la pesée de bacs qu'on déverse dans le réservoir où aspire l'appareil d'alimentation. On a soin de ramener l'eau dans le réservoir au même niveau, au moment initial et au moment final.

C'est la méthode la plus précise. On pourrait aussi déduire le poids Q' des indications d'un compteur d'eau ou de tout autre appareil analogue, mais la précision obtenue serait généralement bien inférieure à celle que donne une bonne balance.

Or Q', avec le facteur q sont les deux termes les plus importants de la formule (3).

Si on pèse l'eau d'alimentation fournie par bacs de 500 kilog. avec une balance donnant l'hectogramme sans incertitude, l'erreur relative limite qu'on peut commettre sur Q' sera :

$$\frac{\Delta Q'}{Q'} = \frac{0,1}{500} = 0,0002 \quad \text{ou} \quad 0,02\ \%.$$

II. Les formules (2) montrent que λ_m *et* q'_m *correspondent aux « ordonnées moyennes » des diagrammes de*

λ *en fonction de* P
q' » » Q'

Digitized by Google

Aucun appareil actuellement ne donne le diagramme de λ en fonction de P, ni de q' en fonction de Q' ; on ne possède que des appareils donnant les diagrammes de la température ou de la pression de vapeur en fonction du temps, et de la température de l'eau d'alimentation également en fonction du temps ; ce sont les ordonnées moyennes de ces deux diagrammes qui servent à passer, au moyen des tables, aux valeurs λ_m et q'_m.

Il en résulte pour λ_m de même que pour q'_m deux erreurs systématiques :

La première résulte de ce que λ n'est pas proportionnel à la pression ou à la température de la vapeur, ni q' à la température de l'eau d'alimentation, cette erreur ne serait nulle que si la pression de la vapeur et la température de l'eau d'alimentation étaient constantes, mais elle est toujours négligeable, parce que si la pression ne varie pas trop de part et d'autre de sa valeur moyenne, λ ne varie que très peu de part et d'autre de λ_m, de telle sorte qu'on ne commet pas grande erreur en supposant que ces variations sont sensiblement linéaires ; quant à q', on sait que s'il n'est pas rigoureusement proportionnel à la température, il s'en faut de très peu ; aussi ne citons-nous ces deux erreurs systématiques que pour mémoire ;

La seconde provient de ce que P et Q' ne sont pas proportionnels au temps, le débit de la vapeur dP/dt et le débit de l'eau d'alimentation dQ'/dt n'étant pas en général constants. Cette erreur pourrait ne pas être négligeable et il y a lieu de la réduire *en rendant le débit de vapeur et celui d'alimentation aussi constant que possible* (1).

(1) Les appareils qui enregistrent le débit de l'eau d'alimentation et le débit de vapeur trouvent ici leur justification s'il s'agit d'une station d'essais très complète.

Pour résoudre complètement le problème, il serait nécessaire de rendre le tambour du manomètre enregistreur solidaire d'une sorte

Digitized by Google

Enfin λ_m comme q'_m sont susceptibles d'une erreur fortuite résultant de l'imperfection inévitable des appareils employés et de l'observateur.

Les chiffres suivants (*voir les démonstrations en note*) donneront une idée de la valeur que peuvent acquérir les erreurs citées :

L'erreur systématique, provenant de ce que λ n'est pas proportionnel à la pression de la vapeur, ne dépasse pas $\Delta_1 \lambda_m = 0{,}035$ cal./kilog., lorsque la pression oscille entre 5 et 6 kg/cm².

L'erreur systématique, provenant de ce que q' n'est pas proportionnel à la température de l'eau d'alimentation, ne dépasse pas $\Delta_1 q'_m = 0{,}0023$ cal./kg, dans le cas où la température de l'eau d'alimentation varierait entre 18° C. et 38° C.

L'erreur systématique, provenant de ce que le débit de la vapeur n'est pas constant est au maximum $\Delta_2 \lambda_m = 0{,}53$ cal./kg, dans le cas où la pression variant entre 5 et 6 kg/cm², le débit de vapeur varierait entre 0,3 et 0,9 kg/sec.

L'erreur systématique, provenant de ce que le débit d'alimentation n'est pas constant, est au maximum $\Delta_2 q'_m = 5$ cal./kg, dans le cas où la température et le

---

de compteur de vapeur, de telle sorte que le « déplacement de ce tambour soit à chaque instant proportionnel au poids total de vapeur déjà formée », de même il faudrait rendre le tambour du thermomètre enregistreur placé sur l'alimentation solidaire d'un compteur d'eau de telle sorte que « son déplacement total soit à chaque instant proportionnel au poids total de l'eau déjà fournie. »

Le perfectionnement serait surtout utile pour l'eau d'alimentation.

Qu'on se rende bien compte d'ailleurs que « si même les deux compteurs ne donnaient qu'une approximation tout à fait grossière, la méthode serait considérablement améliorée », car pour la détermination de Q', il est bien entendu qu'on conserverait la méthode simple et précise qu'est la pesée.

Digitized by Google

débit de l'eau d'alimentation varieraient respectivement entre 18° et 38° et entre 0,03 et 0,9 kg/sec.

l'erreur fortuite, provenant de l'emploi d'un manomètre enregistreur fonctionnant à 1/10 d'atmosphère près, peut atteindre au maximum $\Delta_3 \lambda_m = 0{,}2$ cal./kg.

l'erreur fortuite, provenant de l'emploi sur l'alimentation d'un thermomètre enregistreur dont les indications comportent 1 degré centigrade d'incertitude, aura comme valeur limite : $\Delta_3 q'_m = 1$ cal./kg.

On voit que les erreurs limites qui pourraient affecter λ_m et q'_m, dans l'exemple cité, atteignent :

$$\begin{aligned} \Delta \lambda_m &= \Delta_1 \lambda_m + \Delta_2 \lambda_m + \Delta_3 \lambda_m \\ &\cong (0{,}035 + 0{,}53 + 0{,}2) \text{ cal./kg} \\ &\cong 0{,}75 \text{ cal./kg.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta q'_m &= \Delta_1 q'_m + \Delta_2 q'_m + \Delta_3 q'_m \\ &\cong (0{,}002 + 5 + 1) \text{ cal./kg} \\ &\cong 6 \text{ cal./kg.} \end{aligned}$$

On peut conclure de cet exemple que ce sont les observations relatives à l'eau d'alimentation qui sont de loin les plus importantes. Les observations relatives à la vapeur devront être bien mauvaises pour introduire une erreur notable.

On voit également que la part d'erreur qui revient à une variation éventuelle du débit de vapeur et du débit de l'eau d'alimentation — mais surtout de ce dernier — y entre pour plus des deux tiers : « Il est nécessaire, dans un essai de vaporisation, de maintenir aussi uniforme que possible l'arrivée de l'eau dans la chaudière. »

C'est en somme facile à réaliser, car il est permis de « cesser » l'alimentation aussi fréquemment qu'on le veut.

III. Q_1 et Q_2, poids d'eau contenus dans la chaudière respectivement au moment initial et au moment final, se déduisent des lectures au niveau d'eau.

Digitized by Google

Il faut pour cela que, par un tarage préalable, on sache quelles sont les valeurs du poids d'eau Q pour les diverses hauteurs de niveau.

Ce tarage, à exécuter une fois pour toutes, peut être fait avec une grande précision relative.

Et l'erreur limite tant sur Q_1 que sur Q_2 dépendra de l'approximation possible dans les lectures du niveau d'eau [1].

Supposons, par exemple, que cette erreur limite soit

$$\Delta Q \cong 15 \text{ kg}$$

valeur qui se rapportait à une installation et à une série d'essais dont nous avons tiré les exemples relatifs aux autres erreurs limites.

IV. q_1 et q_2 chaleur de l'eau de la chaudière aux instants initial et final sont prises dans les tables d'après les pressions initiales et finales observées au manomètre. De la précision du manomètre dépend l'erreur limite Δq qui peut affecter ces deux quantités.

Avec un manomètre donnant avec certitude le 1/10 d'atmosphère :

$$\Delta q = 0{,}75 \text{ cal./kg.}$$

V. On peut maintenant se faire une idée de l'erreur limite dont sera affecté le calcul de C :

(1) On pourrait ramener le niveau de l'eau dans la chaudière à l'instant final à ce qu'il était à l'instant initial. La formule (5) dans ce cas se simplifie notablement :

$$C = Q' (\lambda_m - q'_m) + Q (q_2 - q_1).$$

Mais, d'une part, cette pratique n'est guère aisée, et d'autre part elle ne met nullement à l'abri de l'erreur qu'introduit toute lecture au niveau.

Digitized by Google

Lorsque dans la formule (3) on introduit, au lieu des quantités :

$$Q', \lambda_m, q'_m, Q_1, Q_2, q_1, q_2$$

les facteurs

$$Q' + \delta Q', \lambda_m, + \delta \lambda_m, q'_m + \delta q'_m, Q_1 + \delta Q_1, Q_2 + \delta Q_2,$$
$$q_1 + \delta q_1, q_2 + \delta q_2$$

qui en diffèrent par des quantités très petites (erreurs), on obtient une valeur $C + \delta C$ au lieu de la valeur C qu'il faudrait.

La quantité très petite (erreur) δC s'obtient en différenciant l'équation (3), car cette différenciation ne néglige que des « très petits » du second ordre par rapport au « très petit » que l'on calcule :

$$\delta C = Q' (\delta \lambda_m - \delta q'_m) + (\lambda_m - q'_m) \delta Q' + Q_2 . \delta q_2 + q_2 . \delta Q_2$$
$$- Q_1 . \delta q_1 - q_1 \delta Q_1 - (Q_2 - Q_1) \delta \lambda_m - \lambda_m (\delta Q_2 - \delta Q_1).$$

L'erreur limite se produit lorsque $\delta \lambda_m$ et $\delta q'_m$, δq_1 et δq_2, δQ_1 et δQ_2 sont maxima en valeur absolue et de signes contraires. Sa valeur absolue est donc

$$\Delta C = Q' (\Delta \lambda_m + \Delta q'_m) + (\lambda_m - q'_m) \Delta Q' + (Q_1 + Q_2) \Delta q$$
$$+ [2 \lambda_m - (q_1 + q_2)] \Delta Q + | Q_2 - Q_1 | \Delta \lambda_m$$

les termes $(\lambda_m - q'_m) \Delta Q'$ et $| Q_2 - Q_1 | \Delta \lambda_m$ sont si faibles vis-à-vis des autres [1] qu'on peut écrire simplement, en posant

$$\overline{Q_1 + Q_2/2} = Q \quad \text{et} \quad (\lambda_m - \overline{q_1 + q_2/2}) = r :$$
$$\Delta C \cong Q' (\Delta \lambda_m + \Delta q'_m) + 2 Q . \Delta q + 2 r . \Delta Q$$

(1) Pour $\lambda_m - q' \cong 625$ cal./kg. et $\Delta Q' \cong 0{,}0002 \times 100000$ kg. $\cong 2$ kg, il vient : $(\lambda_m - q'_m) \Delta Q' \cong 1250$ calories.
Pour $| Q_1 - Q_2 | \cong 800$ kg et $\Delta \lambda_m \cong 0{,}75$ cal./kg, il vient : $| Q_2 - Q_1 | . \Delta \lambda_m \cong 600$ cal.

Digitized by Google

Supposons :

$$Q \cong 10000 \text{ kg.}, \qquad Q \cong 16000 \text{ kg.}, \qquad r \cong 500 \text{ cal./kg}$$

et remplaçons $\Delta \lambda_m$, $\Delta q'_m$, Δq et ΔQ, par les valeurs trouvées précédemment, il viendra :

$$\Delta C \cong 10000 \text{ kg}(0{,}75 + 6) \text{ cal./kg} + 2 \times 16000 \text{ kg} \times 0{,}75 \text{ cal./kg} + 2 \times 500 \text{ cal./kg} \times 15 \text{ kg}$$

$$\cong (67500 + 24000 + 15000) \text{ calories} \cong 10^5 \text{ calories}$$

soit une erreur relative $\Delta C/C$ de 1 % lorsque C atteint 10^7 calories.

Avec une seule chaudière de 100 m² de surface de chauffe et une vaporisation, relativement faible, de 15 kg par heure et m², il suffira que l'essai dure 7 ½ heures environ pour que C atteigne 10^7 calories. Si on tient compte au surplus de ce que l'erreur δ C n'atteint jamais la valeur « limite » Δ C, il apparaîtra bien clairement que l'erreur relative commise sur C peut être très inférieure à 1 %.

IV. Un essai de chaudière nécessite un certain nombre d'appareils qui sont indispensables ou simplement utiles à la surveillance de l'essai.

Les appareils indispensables sont :

1° Une balance pour peser le combustible consommé s'il s'agit d'un combustible solide ou liquide, et un appareil enregistreur de débit (ou un gazomètre) s'il s'agit d'un combustible gazeux ;

2° Une balance pour peser l'eau d'alimentation ;

3° Un thermomètre, enregistreur de préférence, sur la conduite d'alimentation ;

4° Un manomètre ou thermomètre (1), de préférence enregistreurs, sur la vapeur.

(1) Les deux si la vapeur était surchauffée.

Digitized by Google

Tels sont, avec le niveau d'eau de la chaudière, les appareils de mesure indispensables.

D'autres appareils, sans être indispensables, sont cependant si utiles pour surveiller la marche de la chaudière, qu'on s'en sert même en marche courante. Tels sont :

un enregistreur de dépression, ou mieux un enregistreur de tirage, c'est-à-dire de débit des gaz brûlés ;

un appareil, enregistreur [1] de préférence, pour doser l'anhydre carbonique dans les gaz brûlés, etc.

(1) Des appareils enregistreurs ne sont jamais indispensables, mais ils sont toujours précieux, car on conçoit qu'une moyenne est bien plus sûre lorsqu'elle est déduite d'un diagramme que lorsqu'elle est déduite de lectures discontinues qui ont pu tomber mal à propos, même si elles sont très rapprochées. De plus, l'appareil enregistreur, en libérant l'expérimentateur d'une besogne fastidieuse, lui permet de surveiller réellement son essai et d'y réfléchir. L'enregistreur fait vivre l'essai.

Les appareils enregistreurs sont au surplus utiles même en marche courante, car ils constituent la surveillance la plus complète, la moins coûteuse souvent, et celle qui est le moins à charge au personnel.

On aurait tort de croire d'ailleurs que certains phénomènes n'ont pas besoin d'être surveillés d'une manière continue, parce que trop simples et bien connus. Les phénomènes les plus uniformes, les mieux connus, révèlent souvent des particularités imprévues, qui, sans enregistreur, passent périodiquement inaperçues.

Digitized by Google

NOTES

1. — L'erreur systématique $\Delta_1 \lambda_m$, provenant de ce que λ n'est pas proportionnel à la pression, est d'autant plus faible que les variations pe pression sont plus réduites ; elle serait nulle si la pression restait constante. Dans l'hypothèse où la pression absolue oscille entre 5 et 6 kg/cm², elle ne dépasse pas 0,035 cal./kg.

En effet, appelons K le rapport d'une valeur quelconque de λ à la pression p correspond :

$$\lambda = K\,p$$

les tables montrent que ce rapport diminue à mesure que p croît.

Soit K_m la valeur de K correspondant à l'ordonnée moyenne p_m du diagramme de la pression en fonction de P, et représentons-nous (fig. 1) en fonction de cette même variable, les diagrammes de $K_m\,p$

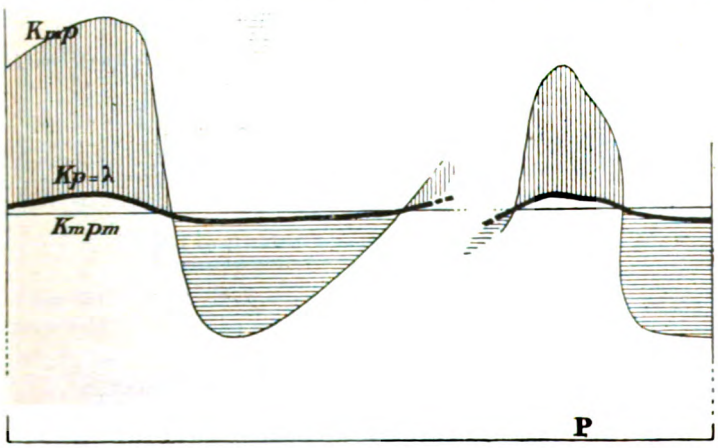


Fig. 1.

et de $K\,p = \lambda$. Ils se coupent sur l'horizontale figurant $K_m\,p_m$ Entre les points d'intersection, la courbe Kp est toujours comprise entre la courbe $K_m\,p$ et l'horizontale $K_m\,p_m$, car

$K > K_m$	$K = K_m$	$K < K_m$
pour $p < p_m$	pour $p = p_m$	pour $p > p_m$

Digitized by Google

L'erreur commise sur λ_m est représentée par le quotient de la différence des aires hachurées par l'abscisse totale.

Or, il est évident que pour deux valeurs extrêmes données de la pression, le cas qui donne la plus grande erreur est compris dans ceux pour lesquels la pression ne prend que les deux valeurs extrêmes considérées. Et parmi les cas ainsi définis, le plus défavorable est celui où la pression moyenne est à égale distance des deux extrêmes.

Entre 5 et 6 kg/cm², l'erreur limite $\Delta_2 \lambda_m$ se produirait donc dans le cas suivant :

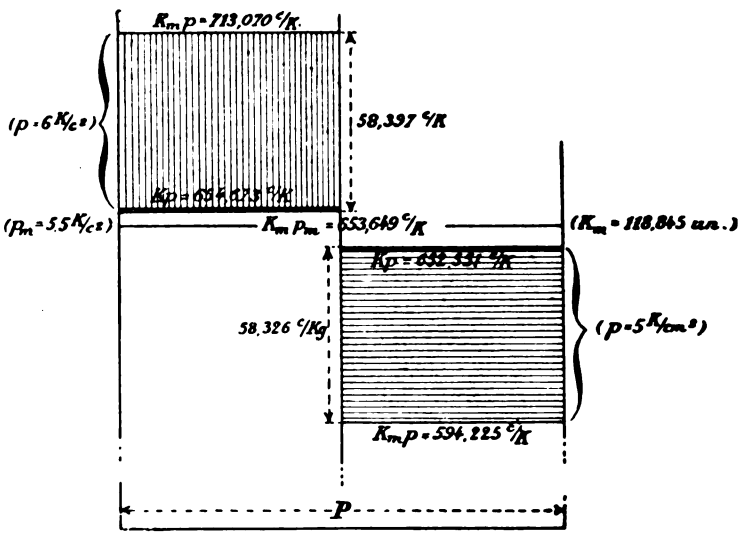


Fig. 2.

Et on a :

$$\Delta_1 \lambda_m = \frac{58{,}397 \text{ cal./kg} \times \frac{P}{2} - 58{,}326 \text{ cal./kg} \times \frac{P}{2}}{P}$$

$$= \frac{1}{2}(58{,}397 - 58{,}326) \text{ cal./kg} = 0{,}035 \text{ cal./kg}.$$

2. — L'erreur systématique $\Delta_2 \lambda_m$, provenant de ce que P n'est pas, en général, proportionnel au temps, est d'autant plus grande que le débit dP/dt varie plus, lorsque la pression n'est pas constante. Or, une forte demande de vapeur tend à produire une baisse de pression, tandis qu'un ralentissement du débit tend à produire une surpression.

Digitized by Google

Il en résulte que les erreurs ont une tendance à se produire dans un sens constant et à s'accumuler.

Pour deux valeurs extrêmes données du débit et de la pression, le cas qui donne la plus grande erreur est évidemment compris dans ceux pour lesquels le débit et la pression gardent ensemble leurs valeurs extrêmes, sans prendre de valeurs intermédiaires, le débit maximum coïncidant toujours avec la pression minima ; et parmi les cas ainsi définis, un des plus défavorables est celui où l'ensemble des fortes pressions a duré autant que l'ensemble des faibles pressions. Nous aurons donc l'erreur limite — pour des valeurs extrêmes données de la pression (5 et 6 kg/cm) et des valeurs extrêmes données du débit (0,3 et 0,9 kg/sec.) — en calculant l'erreur dans le cas suivant :

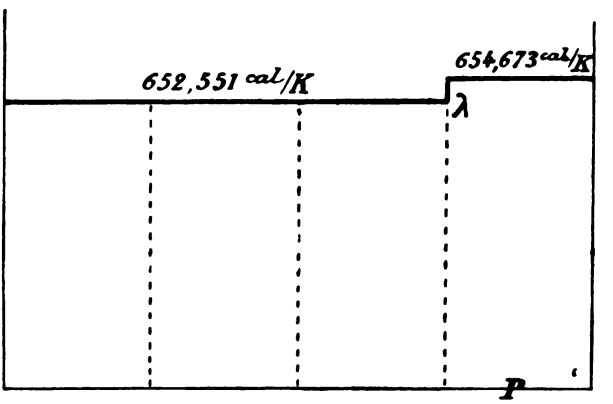


Fig. 3.

Le diagramme de λ en fonction du temps a comme ordonnée moyenne :

$$653{,}612 \text{ cal./kg.}$$

Or, le diagramme de λ en fonction de P a comme ordonnée moyenne :

$$\lambda_m = 654{,}143 \text{ cal./kg.}$$

On voit que l'erreur aurait été $\Delta_2 \lambda_m = 0{,}530$ cal./kg.

3. — L'erreur systématique $\Delta_1 q'_m$, provenant de ce que q' n'est pas rigoureusement proportionnel à la température, est d'autant plus petite que la température de l'eau varie moins. Elle est évidemment négligeable.

On peut s'en assurer :

Digitized by Google

Appelons K' le rapport d'une valeur quelconque de q' à la valeur correspondante de la température $\mathfrak{T}'$

$$q' = K' \mathfrak{T}'$$

les tables montrent que ce rapport croît avec $\mathfrak{T}'$.

Soit K'_m la valeur de ce rapport pour l'ordonnée moyenne $\mathfrak{T}'_m$ du diagramme de $\mathfrak{T}'$ en fonction de Q', et représentons-nous, en fonctions de cette même variable, le diagramme de $K'_m \mathfrak{T}'$ et celui de $K' \mathfrak{T}' = q'$. Ils se coupent sur l'horizontale figurant $K'_m \mathfrak{T}'_m$. De part et d'autre des points d'intersection, les deux courbes sont toujours situées du même côté de l'horizontale, avec la courbe $K' \mathfrak{T}'$ en dehors.

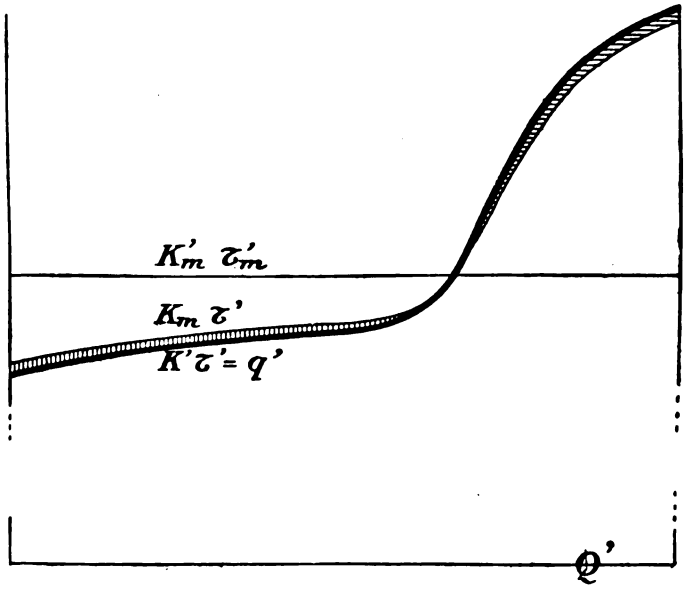


Fig. 4.

Car $K' < K'_m$ pour $\mathfrak{T}' < \mathfrak{T}'_m$ $\quad$ $K' = K'_m$ pour $\mathfrak{T}' = \mathfrak{T}'_m$ $\quad$ $K' > K'_m$ pour $\mathfrak{T}' > \mathfrak{T}'_m$.

L'erreur commise sur q'_m est représentée par le quotient de la différence des aires hachurées par l'abscisse totale.

Calculons-la dans le cas ci-dessous :

$$\Delta_1 q'_m < \frac{1}{Q'}\left(\frac{Q'}{4} \times 0{,}0152 \text{ cal./kg.} - \frac{Q'}{4} \times 0{,}0059 \text{ cal./kg.}\right)$$
$$< 0{,}0023 \text{ cal./kg.}$$

Digitized by Google

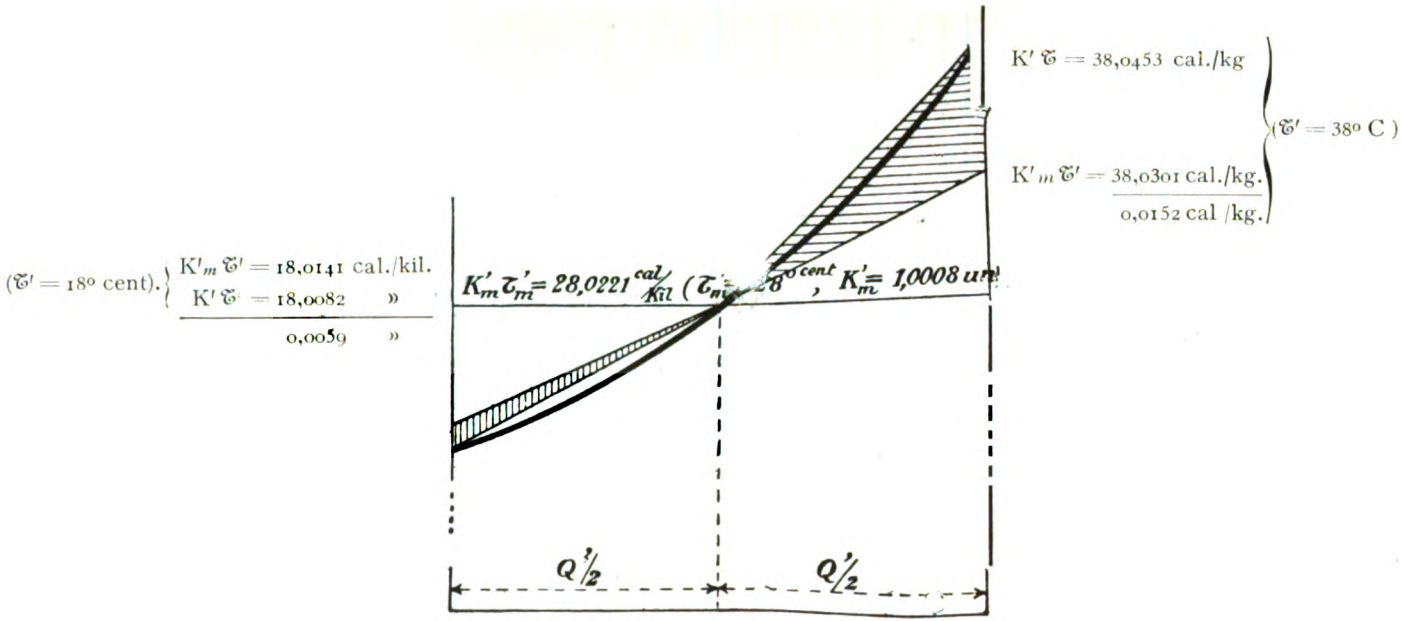


Fig. 5.

Digitized by Google

4. — L'erreur systématique $\Delta_2 q'_m$, provenant de ce que Q' n'est pas, en général, proportionnel au temps, est d'autant plus grande que le débit $d\,Q'/dt$ est plus irrégulier, lorsque la température n'est pas constante.

Un raisonnement identique à celui que nous avons fait pour $\Delta_2 \lambda_m$ montre que pour deux valeurs extrêmes de la température : 18 degrés cent. et 38 degrés cent., et deux valeurs extrêmes du débit : 0,9 kg./sec. et 0,3 kg./sec., l'erreur limite $\Delta_2 q'_m$ se produirait dans le cas suivant :

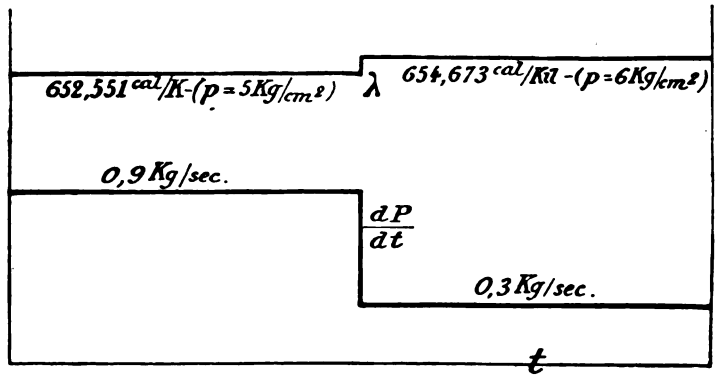


Fig. 6

Le diagramme de q' en fonction du temps a comme ordonnée moyenne : 23 cal./kg.

Or, le diagramme de q' en fonction Q' a comme ordonnée moyenne : $q'_m = 28$ cal./kg.

On voit que l'erreur aurait été $\Delta_2 q'_m = 5$ cal./kg.

(A suivre.)

M. Bouffart.

Digitized by Google

5 ss.3 Quelques réflexions au sujet des chapitres « Électromagnétisme et Induction » du cours élémentaire d'Électricité.

1. — Il n'est sans doute pas inutile de rappeler de temps en temps, que l'électricité est une science à base expérimentale, bien qu'il ne soit pas moins vrai que l'analyse y tient une place considérable. Un de ses rôles consiste à condenser les résultats expérimentaux en quelques formules synthétiques aussi simples que possible. A la faveur d'une ou de plusieurs hypothèses et d'un appareil mathématique plus ou moins compliqué, ces formules conduisent à des déductions et des résultats que de nouvelles expériences doivent confirmer. Celles-ci donneront d'ailleurs, la mesure de la fécondité et de la rectitude des hypothèses faites, car au bout du calcul le plus habile on ne peut que retrouver les hypothèses du début, sous une forme plus féconde ou plus précise. Il est bien entendu que c'est là le sort commun de toutes les sciences et les précédentes constatations ne desservent en rien la science électrique. Ne trouvons-nous pas à la base des mathématiques, la science exacte par excellence, quelques postulats — Poincaré en compte huit en géométrie — qu'il faut admettre de bonne grâce, mais qui disparaissent assez vite dans l'enchevêtrement et la multiplicité des déductions. Dans l'état actuel de la science électrique, la meilleure volonté est inopérante pour faire oublier les hypothèses de début, parce qu'à chaque pas leur imper-

Digitized by Google

fection apparaît dans le vaste champ de l'exploration expérimentale. Nous devons, en conséquence, ne pas nous montrer trop éclectique en la matière, et nous préoccuper avant tout du but à atteindre : celui de mettre en évidence des résultats nouveaux que l'expérience vérifiera. Il ne faut donc pas trop s'inquiéter de la légitimité des hypothèses faites, ou implicitement admises, ni faire état d'une trop grande rigueur dans les démonstrations du début ; la mise au point et une forme de raisonnement plus impeccable seront le rôle de l'avenir.

***

2. — Cet ordre d'idées se trouve être illustré, d'une manière frappante, par l'étude du chapitre de l'électromagnétisme d'un cours élémentaire d'électricité.

Comme base expérimentale nous y trouvons l'expérience d'Oersted, donnant le sens de l'action du courant sur un pôle magnétique, et celle relative à la production en se servant de limaille de fer, du spectre des lignes de forces magnétiques créées par un courant rectiligne. La direction de celles-ci données, par l'expérience d'Oersted, se traduit le plus simplement par la règle du tire-bouchon de Maxwell. A côté de ces expériences qualitatives, nous possédons les expériences quantitatives de Biot et de Savart, donnant l'intensité du champ produit par un courant rectiligne indéfini

$$\mathcal{H} = A\frac{2i}{d}$$

et celles déterminant la valeur du champ au centre d'un courant circulaire

$$\mathcal{H} = A\frac{2\pi i}{R}.$$

Nous pouvons citer encore les expériences de Pender

Digitized by Google

et Rowland, qui démontrent que le déplacement sous une vitesse v de petites sphères portant une charge électrique équivaut à un courant électrique en ses effets électromagnétiques et donne, par conséquent, naissance à un effort mécanique sur une masse magnétique existante.

***

3. — Pour coordonner ces expériences nous allons écrire une formule synthétique. Si nous invoquions comme justification générale de celle-ci, le fait qu'elle vérifie les quelques expériences que nous venons de citer, nous userions certes d'une argumentation un peu faible. Aussi dirons-nous que la formule que nous allons poser, se trouvant être vérifiée *a posteriori,* dans toutes les déductions et toutes les applications qu'on en a fait depuis un demi-siècle, peut être considérée, jusqu'à nouvel ordre, comme la base de la théorie mathématique élémentaire de l'électro-magnétisme. Le fait de poser une loi, qui n'a aucune réalité physique, se justifie par ce besoin de généralisation et de synthèse qui est la base de toute science spéculative. Aussi y appliquerons-nous les ressources du calcul pour en déduire les résultats les plus divers, sous réserve de vérification expérimentale, sans nous préoccuper si la loi élémentaire que nous allons poser correspond à une vérité objective, mais bien si nous parviendrons à en déduire des résultats légitimes sur lesquels on pourra tabler sans aucun doute. Il peut être intéressant d'observer, à titre de comparaison, qu'en calcul infinitésimal on commet systématiquement des erreurs en négligeant des infiniment petits d'ordre supérieur, mais comme les résultats intégraux restent légitimes, nous pouvons appliquer sans arrière-pensée les règles du calcul intégral, jusqu'à preuve du contraire.

Digitized by Google

***

4. — Ces réserves faites, nous énoncerons la loi synthétique élémentaire de l'électromagnétisme et de l'induction comme suit (fig. 1) :

« Si nous supposons une charge électrique dq animée » d'une vitesse v suivant $dl = v\,dt$ dans un champ dont » la composante normale à la direction de cette vitesse, » soit $\mathcal{B}_n$, il naît sur la charge dq un effort df donné par » la relation

$$df = v\,dq\,\mathcal{B}_n. \quad (*)$$

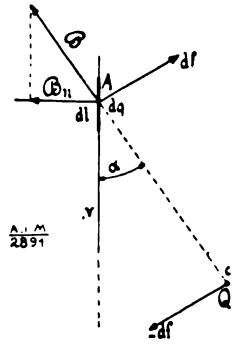


Fig. 1.

La direction de cet effort est normale au plan ($v\,\mathcal{B}_n$) et donnée par la règle des trois doigts de la main gauche de Fleming (fig. 2) (action d'un champ sur courant). Si, en particulier, le champ magnétique est produit par la charge magnétique Q, en vertu de la loi de l'égalité de l'action et de la réaction, il s'exercera sur cette masse un effort

$$-\,df = v\,dq\,\mathcal{B}_n$$

(*) M. O. Colard, professeur à l'Université de Gand, fait usage depuis quelques années, dans son cours théorique de l'Ecole du Génie Civil, d'une formule équivalente.

Digitized by Google

dont la direction est donnée par la règle du tire-bouchon de Maxwell (action d'un courant sur un champ). Nous pouvons concevoir que l'effort $(-df)$ est dû à l'existence d'un champ magnétique, créé par le mouvement de la charge dq dans le champ créé par la masse magnétique Q,

Fig. 2. — Main gauche (action d'un champ sur un courant).

champ que nous pouvons d'ailleurs mettre en évidence par le spectre de limaille. Par extension, et à un point de vue de généralisation, on dira que l'effort df est dû à l'existence d'un champ électrique naissant dans le milieu que nous avons décrit, et agissant sur la charge dq pour produire l'effort df, le tout d'après un mécanisme dont le secret nous échappe.

* * *

5. — Le champ électrique créé en A a pour valeur, par définition.

$$H_1 = \frac{df}{dq} = v\,\mathcal{B}_n = v\,\mathcal{B}\sin\alpha.$$

Le champ magnétique créé au droit de la charge Q, au point C, sera :

$$\mathcal{H}_1 = \frac{df}{Q} = \frac{vdq\,\mathcal{B}_n}{Q} = \frac{vdq\,Q\sin\alpha}{Q\,r^2}$$

Digitized by Google

Or, par définition,

$$\frac{dq \sin \alpha}{r^2} = B_n \text{ au point C}$$

donc

$$\mathcal{H}_1 = v\, B_n$$

6. — Pour passer aux formules d'usage courant, il faut faire apparaître la notion d'intensité de courant. A cette fin remarquons qu'en vertu des expériences de Pender et Rowland, nous pouvons assimiler les charges traversant l'élément dl à un courant électrique dont l'intensité est

$$i = \frac{dq}{dt}.$$

La charge dq parcourant l'élément de conducteur dl avec la vitesse v, on aura

$$v = \frac{dl}{dt}$$

d'où la relation $v\,dq = i\,dl$.

***

7. (*). — Nous pouvons développer quelque peu les principes exposés ci-dessus. A cette fin, considérons une charge électrique positive répandue sur la surface d'une petite sphère isolée. A l'état de repos, cette charge crée un champ électrostatique dont les lignes de force rayonnent symétriquement dans toutes les directions à partir de la surface de la sphère. Malgré les essais de représentation mécanique des déformations de l'éther, nous ignorons complètement quelle est la nature du champ électrostatique, autant d'ailleurs que nous ignorons la nature des charges électriques élémentaires. Nos connaissances

(*) Dans une première lecture les paragraphes 7 et 9 peuvent être omis.

Digitized by Google

se bornent à savoir que les lignes de force du champ présentent une tension suivant leur direction et une pression à angle droit.

Supposons maintenant la petite sphère à l'état de mouvement : il apparaît alors un phénomène nouveau qui est l'apparition du champ magnétique. Sa nature nous est également inconnue, nous savons seulement qu'il diffère totalement du champ électrostatique. Cependant, les tubes de forces présentent également une tension longitudinale et une pression transversale.

D'après l'expérience de Pender et Rowland, une succession de charges électriques en mouvement équivaut à un courant ; on peut prévoir, en conséquence, que les lignes de forces magnétiques sont des cercles dont les centres se trouvent sur la trajectoire et dont le plan est normal à la direction du mouvement.

Aussi la tendance moderne de la théorie est de considérer le champ magnétique comme engendré en chaque point par le déplacement d'un champ électrostatique. Les deux principes suivants, dont le premier se substitue à la loi de Biot et Savart et dont le second synthétise la loi d'induction électromagnétique, deviennent dès lors la base de la théorie élémentaire.

« En un point donné où un champ électrostatique B se » déplace avec une vitesse v apparaît un champ magné- » tique $\mathcal{H}_1$ dont la direction est perpendiculaire au plan » défini par la direction du champ électrostatique et celle » du mouvement, dont la grandeur est donnée par

$$\mathcal{H}_1 = \mathrm{K\,B}\,v \sin \alpha \qquad (1)$$

» α étant l'angle du champ électrostatique et de la direc- » tion du mouvement, B étant exprimé en unités du » système électrostatique et K étant le coefficient de la » loi de Coulomb représenté par le carré de la vitesse de

Digitized by Google

» la lumière. La direction de $\mathcal{H}_1$ est celle donnée par la » règle du tire-bouchon.

» Réciproquement, en un point où un champ magné- » tique $\mathcal{B}$ se déplace avec une vitesse v faisant avec lui » un angle α apparaît un champ électrique dont la direc- » tion est perpendiculaire au plan formé par le champ » magnétique et la direction du mouvement et dont la » grandeur est donnée par

$$H_1 = K \mathcal{B} v \sin \alpha \qquad (2)$$

Reprenons le cas de la sphère électrisée en mouvement rectiligne uniforme ; un champ magnétique constant se superpose au champ électrostatique constant, tous deux étant entraînés dans le mouvement. Supposons que la vitesse v varie. Dans cette hypothèse un troisième phénomène intervient : c'est l'induction électromagnétique de self. En effet, le champ magnétique $\mathcal{H}_1 = B v \sin \alpha$ va varier de $d\mathcal{H}_1$ quand la vitesse varie de $d v$.

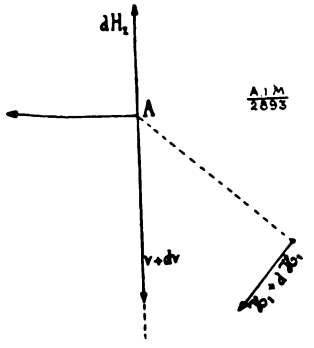


Fig. 3.

En définissant l'intensité du courant par la relation $i = dq/dt$ comme on a $v = dl/dt$, soit $v\,dq = i\,dl$, nous

Digitized by Google

voyons qu'admettre une variation de la vitesse revient à une variation de l'intensité du courant.

Au champ $d\mathcal{H}_1$ correspond un effort donné par la règle de Fleming (fig. 2) qui tend à écarter l'élément dl vers la gauche. Nous pouvons donc, au point de vue des efforts électromagnétiques, assimiler la variation de v (ou de i) à un déplacement du conducteur dl vers la gauche, dans le champ magnétique $\mathcal{H}$ (fig. 3). Alors, par application de la loi générale (2), il naîtra un nouveau champ électrostatique dH_2 dont la direction est donnée par la règle des trois doigts de Fleming (main gauche). Or, par définition, $d_2E = -dH_2\,dl$, si dl est dirigé vers les potentiels décroissants, c'est-à-dire dans le sens du courant. La force électromotrice de self-induction produite par une variation de v est donc de sens opposé au signe de dv ou de di. Elle peut être donnée (fig. 4) par la règle de Fleming (main droite) comme nous le verrons dans un cas plus général (voir n° 12).

Fig. 4. — Main droite (loi de l'induction).

Remarquons que ce phénomène d'induction ou plus exactement de self-induction simule l'inertie et que tout se passe comme si la masse de notre sphère subissait un accroissement de charge électrique.

Digitized by Google

***

8. — La variation du champ magnétique par suite de l'accélération positive ou négative de la sphère entraîne également un quatrième phénomène, le plus important de la physique, et qui est la radiation.

Le champ électrostatique d'induction provenant de la variation du champ magnétique réagit en effet sur celui-ci, lequel, à son tour, influe sur le champ électrique et ainsi de suite. En soumettant la question au calcul, Maxwell montra que ces perturbations réciproques des deux champs ne sont pas stationnaires dans l'espace, mais se propagent au loin avec une vitesse dépendant de la perméabilité et du pouvoir inducteur spécifique du milieu et égale à celle de la lumière.

Cette impulsion électromagnétique qui se lance dans l'espace à la manière d'une onde lumineuse doit être considérée comme constituée par deux champs : l'un magnétique, l'autre électrique, voyageant ensemble, perpendiculaires entre eux et tous deux normaux à la direction de la propagation. Celle-ci est donc accompagnée également d'un transport d'énergie correspondant à l'énergie électromagnétique des deux champs en mouvement.

Toute variation dans l'état de mouvement de la sphère électrisée provoque donc une radiation électromagnétique dans l'espace.

L'expression générale de la quantité d'énergie rayonnée par seconde a été donnée par Larmor sous la forme :

$$\frac{2}{3}\,\frac{H\,q^2}{V}\left(\frac{dv}{dt}\right)^2$$

où dv/dt représente l'accélération de la charge q, et v la

Digitized by Google

vitesse de la lumière. Si les variations du mouvement sont périodiques (charge électrique en mouvement vibratoire rectiligne, circulaire ou elliptique), la radiation se produit sous forme d'une succession d'ondes dont la lumière est un cas particulier et qui peuvent varier depuis les ondes ultra-violettes les plus courtes jusqu'aux ondes hertziennes les plus longues.

Si, par exemple, un électron tourne dans une orbite circulaire avec une fréquence égale à 5×10^{14}, il émettra une radiation de longueur d'onde égale à 6×10^{-5}, c'est-à-dire de la lumière rouge.

On comprend dès lors l'importance de l'étude dynamique d'une charge électrique, puisque ce qui précède constitue la synthèse de l'électricité, de l'optique et de l'énergie rayonnante sous toutes ses formes.

***

9. — On peut dire en résumé, avec M. Righi, que les électrons déterminent la production des phénomènes électrostatiques quand ils sont immobiles, des phénomènes magnétostatiques ou des courants constants quand ils constituent un flux uniforme et des phénomènes électromagnétiques ou optiques (on peut même ajouter des phénomènes calorifiques et tous ceux où apparaît l'énergie rayonnante) lorsqu'ils possèdent un mouvement périodique.

Cela posé, si nous supposons qu'une charge électrique telle qu'un électron, animée d'une grande vitesse, est brusquement arrêtée dans son mouvement, il est clair que l'onde électromagnétique qui, par le fait même, a pris naissance et s'élance au loin sera extraordinairement énergique. Elle aura dans l'espace la forme d'une couche excessivement mince, car l'épaisseur de l'onde est égale

Digitized by Google

au produit de sa vitesse de propagation par la durée extrêmement courte nécessitée par l'arrêt de l'électron.

Cette onde comportera avec elle une quantité relativement considérable d'énergie, car dans son épaisseur les champs magnétiques et statiques seront très intenses, étant donnée la soudaineté de l'arrêt qui lui a donné naissance.

* * *

10. — Sans insister davantage sur ces considérations d'ordre philosophique, nous reprendrons notre exposé beaucoup plus modeste qui se borne à déduire des formules fondamentales, les équations d'usage courant. Il suffit à cette fin de faire dans les formules fondamentales les substitutions nécessaires.

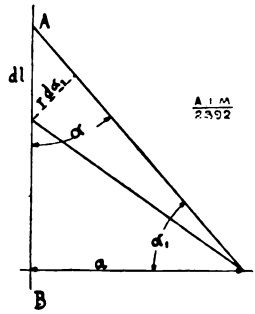


Fig. 5.

La loi d'Ampère s'obtiendra comme suit :

$$df = vdq\,\mathcal{B}_n = vdq\,\frac{Q\sin\alpha}{r^2} \tag{4}$$

$$\frac{df}{Q} = d\mathcal{H}_1 = idl\,\frac{\sin\alpha}{r^2}$$

La valeur de l'effort exercé par un champ sur un élément de courant se mettra sous la forme

$$df = idl\,\mathcal{B}_n. \tag{5}$$

Digitized by Google

La direction est donnée par la règle de Fleming (main gauche, fig. 2).

La loi de Biot et Savart se déduira par intégration de la formule (4). Si nous considérons la fig. 5 nous aurons, pour un élément dl du courant indéfini AB,

$$d\mathcal{H} = \frac{idl \sin \alpha}{r^2}$$

$$dl = \frac{r\, d\alpha_1}{\cos \alpha} \quad \text{et} \quad r = \frac{a}{\cos \alpha} \quad \text{donc } dl = \frac{a\, d\alpha_1}{\cos^2 \alpha}$$

$$d\mathcal{H} = \frac{i}{a} \sin \alpha\, d\alpha_1 = \frac{i}{a} \cos \alpha_1\, d\alpha_1$$

$$\mathcal{H} = \frac{i}{a} \left[\sin \alpha_1 \right]_{+\frac{\pi}{2}}^{-\frac{\pi}{2}} = \frac{2i}{a}$$

La formule donnant le champ au centre d'un courant circulaire ou en un point de la perpendiculaire passant par ce centre s'obtiendra facilement.

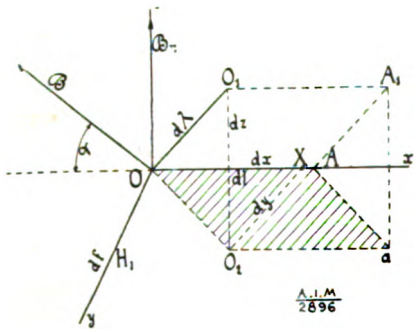


Fig. 6.

***

11. — Evaluons à présent le travail élémentaire $d\mathfrak{T}$ produit par le déplacement $d\lambda$ de l'élément de conducteur

Digitized by Google

dl parcouru par le courant i dans le champ magnétique $\mathcal{B}$.

Considérons (fig. 6) trois axes rectangulaires dirigés suivant les trois doigts de la main gauche placés suivant les arêtes d'un trièdre rectangle (règle de Fleming).

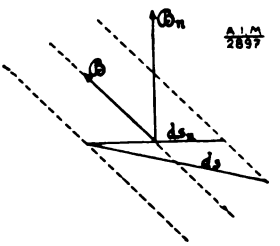


Fig. 7.

L'élément dl dans son déplacement décrit la surface OA O_1A_1 ; le travail élémentaire développé est

$$\overline{d^2\mathfrak{T}} = \overline{d\lambda} \,.\, \overline{df}$$

Or
$$\overline{d\lambda} = \overline{dx} + \overline{dy} + \overline{dz}$$

donc
$$\overline{d^2\mathfrak{T}} = \overline{df}\,\overline{dx} + \overline{df}\,\overline{dy} + \overline{df}\,\overline{dz}$$

et comme

$$\overline{df}\,\overline{dx} = o \qquad \overline{df}\,\overline{dz} = o$$

donc
$$\overline{d^2\mathfrak{T}} = \overline{df}\,\overline{dy} = i\,\mathcal{B}_n\,dl\,dy$$

Remarquons que le flux $d^2\mathfrak{N}$ qui traverse la surface oA o_1A vaut, d'une manière générale, $\overline{\mathcal{B}ds}$. Or, on a (fig. 7), $\overline{\mathcal{B}ds} = (\mathcal{B}_n) \,.\, ds_n)$ expression qui devient, dans le cas présent, $\mathcal{B}_n \times (o\text{A} \times o_2\text{X})$ ou $\mathcal{B}_n\,dl\,dy$ et, par conséquent,

$$d^2\mathfrak{T} = i\,d^2\mathfrak{N}$$
$$d\mathfrak{T} = i\,d\,\mathfrak{N}.$$

Digitized by Google

***

12. — Appliquons cette formule à une boucle de courant se déplaçant de A où elle coupe le flux $\mathfrak{N}_1$ en B, où elle

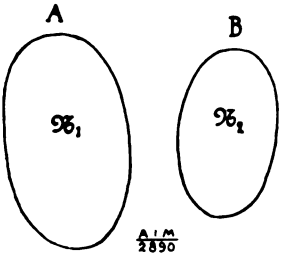


Fig. 8.

coupe le flux $\mathfrak{N}_2$ (fig. 8). On aura par application de la formule ci-dessus :

$$\int d\mathfrak{T} = \int i\, d\mathfrak{N}$$

$$\mathfrak{T} = i\,(\mathfrak{N}_1 - \mathfrak{N}_2).$$

Si la boucle s'éloigne jusqu'aux limites du champ $\mathfrak{N}_2 = o$. Nous en concluons que l'énergie potentielle d'une boucle de courant se trouvant dans un champ est en valeur absolue.

$$W = \mathfrak{N}\, i.$$

***

13. — *Induction électromagnétique.* — Puisque nous imprimons une vitesse $d\lambda/dt$ à l'élément de courant dl il y a modification de la vitesse de déplacement de la masse dq par rapport au champ magnétique, le phénomène d'induction électromagnétique apparaît, dont l'énoncé général

Digitized by Google

est bien connu. Le phénomène est d'ailleurs indépendant de l'existence de la charge dq ou du courant i. (*).

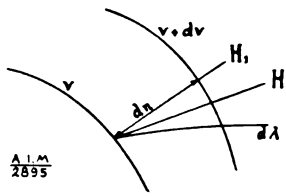


Fig. 9.

Pour établir la formule générale de l'induction nous raisonnerons comme suit : Le chemin $d\lambda$ coupe le champ électrique H_1 et le champ magnétique $\mathcal{B}$. En appliquant la définition de la force électromotrice, nous pouvons écrire dans le cas particulier de la fig. 7 :

$$\overline{dE} = -H_1 \overline{d\lambda} \tag{3}$$

puisque $d\lambda_y$ est dirigé vers les potentiels décroissants

(*) Rappelons que nous pouvons définir la force électromotrice dans un élément de conducteur par la relation $H_1\, dn = -dv = dE$, dn étant dirigé vers les potentiels croissants où, d'une manière générale, par la relation $dE = H\, \overline{d\lambda}$ (fig. 9). De même la force

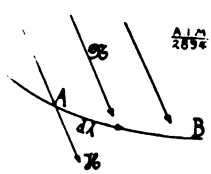


Fig. 10.

magnétomotrice existante entre deux points A et B d'une ligne se trouvant dans un champ magnétique (fig. 10) sera définie par la relation

$$\mathfrak{M}_A^B = \int_A^B \mathcal{H} \cdot \overline{d\lambda}$$

Digitized by Google

donnés par la direction de H_1 ou le sens de df. Or, par définition nous avons encore

$$H_1 = \frac{df}{dq}$$

$$-dE = \frac{1}{dq} df \overline{d\lambda} = \frac{1}{dq} \cdot i\, d^2 \mathfrak{N}$$

mais $\quad vdq = idl \qquad \frac{1}{dq} = \frac{v}{idl} = \frac{v}{ivdt} = \frac{1}{idt}$

donc $$-dE = \frac{d^2 \mathfrak{N}}{dt}$$

$$E = -\frac{d\mathfrak{N}}{dt}$$

***

13. — Nous pouvons énoncer cette loi d'après la forme connue. Il résulte de la formule (3) que le sens de cette force électromotrice est opposé à H_1 et peut être donné par une règle mnémotechnique telle que la règle de la main droite de Fleming (voir fig. 3). Si nous l'appliquons à une boucle de courant, nous trouverons que la force électromotrice induite dans cette boucle quand le champ varie à travers celle-ci (soit que la boucle se déplace, soit que l'induction $\mathcal{B}$ varie) donne lieu à un courant dont le sens est tel que les réactions électromagnétiques produites s'opposent à la variation de $\mathfrak{N}$. Nous avons en somme établi cette relation capitale en faisant appel seulement au principe de l'action égale à la réaction.

***

14. — On établit souvent la formule de l'induction en faisant application au système, formé d'une source de

Digitized by Google

force électromotrice et d'un courant mobile dans un champ magnétique $\mathcal{B}$, du principe de la conservation de l'énergie, sans justifier cependant la légitimité de cette application. Sous cette réserve la formule s'établit en raisonnant comme suit :

La variation d'énergie potentielle $id\mathfrak{N}$ résultant soit du déplacement du circuit, soit de la variation de $\mathcal{B}$, correspond à un travail électrique que nous pouvons mettre sous la forme $Eidt$.

Nous aurons dès lors $id\mathfrak{N} = -Eidt$.

d'où $$E = -\frac{d\mathfrak{N}}{dt}.$$

Le sens de E est donné par la règle des 3 doigts de la main droite quand il y a mouvement. S'il s'agit d'une variation du flux à travers le circuit, on peut opérer par déplacement équivalent de celui-ci, ou appliquer la règle inverse du tire-bouchon : on enfonce celui-ci dans le sens des lignes de forces décroissantes, son sens de rotation donnera le sens de E.

***

15. — *Expression de la force magnétomotrice.* — Si nous

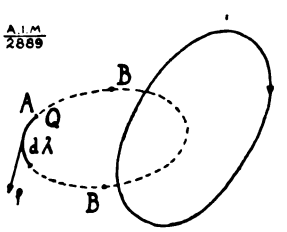


Fig. 11.

considérons (fig. 11) une boucle de courant et une ligne quelconque dans le champ coupant la boucle et une

Digitized by Google

charge Q en A nous aurons par définition de la force magnétomotrice existante au point A.

$$d\mathfrak{M} = \mathfrak{H}\, d\lambda$$

$\mathfrak{H}$ étant le champ au point A égal par définition à f/Q. f étant la force électromagnétique existante en A. On aura donc

$$d\,\mathfrak{M} = \frac{f}{Q}\, d\lambda = \frac{i\, d\mathfrak{N}}{Q}$$

$d\mathfrak{N}$ étant la variation du flux pour le déplacement $d\lambda$. En vertu du théorème de Gauss :

$$\mathfrak{N} = Q\,\omega \qquad \text{donc} \qquad d\,\mathfrak{N} = Q\, d\omega.$$

et, par suite :

$$d\,\mathrm{M} = i d\omega$$

$$\mathfrak{M}_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} = \int_{\mathrm{A}}^{\mathrm{B}} i d\omega = i\,(\omega_{\mathrm{B}} - \omega_{\mathrm{A}})$$

Si nous parcourons la ligne ABA en coupant le circuit on a $w_{\mathrm{B}} - \omega_{\mathrm{A}} = 4\,\pi$, et si nous décrivons ce chemin n fois, nous retrouvons la formule fondamentale donnant la force magnétomotrice d'un solénoïde $\mathfrak{M} = 4\,\pi\, ni$, que l'on établit habituellement par voie expérimentale et application de la théorie des feuillets magnétiques.

***

RÉSUMÉ. — La présente note a simplement pour but de montrer, que si l'on admet comme base de l'étude du chapitre de l'électro-magnétisme et de l'induction une formule synthétique telle que $df = v dq \mathcal{B}_n$, les formules fondamentales de ce chapitre s'en déduisent très facile-

Digitized by Google

ment et très rapidement par application des définitions. Posant $i = dq/dt$ on a successivement $vdq = idl$ (1).

$$d\mathcal{H} = \frac{idl \sin \alpha}{r^2} \quad (2) \qquad\qquad dE = -\frac{d\mathfrak{N}}{dt} \quad (5)$$

$$df = i\mathcal{B}_n dl \quad (3) \qquad\qquad d\mathfrak{M} = id\omega \quad (6)$$

$$d\mathfrak{E} = i\, d\mathfrak{N} \quad (4) \qquad\qquad \mathfrak{M}^1{}_1{}'' = 4\pi ni \quad (7)$$

O. STEELS.

Digitized by Google

CHRONIQUE.

621.312 Sur la ventilation des grosses machines. — Filtres d'air à jets d'eau.

Une discussion très instructive s'est produite récemment au XVIIIe Congrès annuel de la « Municipal Electrical Association », à la suite d'une causerie de M. Christie sur les filtres d'air dont on munit les puissants turbo-générateurs modernes. Dans le domaine spécial de la ventilation des grosses machines, les praticiens anglais ont, depuis quelques années, réalisé des expériences encore peu connues sur le continent et dont il nous semble intéressant de signaler les heureux résultats.

On sait que ce qui limite en fait la puissance utile d'une machine, c'est l'élévation de sa température. Les constructeurs, combattant l'échauffement grâce à une ventilation forcée, sont parvenus à augmenter de plus en plus la puissance spécifique des machines, tout en améliorant le rendement et réduisant le prix de revient unitaire. Mais la ventilation forcée a nécessairement entraîné une certaine complication des installations. L'air est ordinairement pris à l'extérieur du bâtiment et amené par de larges conduites dans l'enveloppe des turbos, grâce à l'action de ventilateurs spéciaux ou de simples ailettes dont on munit les rotors. D'aucuns préconisent la combinaison de ces deux types de ventilateurs, quand il s'agit d'aérer des unités puissantes ; le fonctionnement en série a cependant donné lieu à quelques mécomptes. On peut

Digitized by Google

prévoir dans une grande centrale un véritable réseau de conduites de ventilation, comprenant une dérivation vers chacune des machines ; chaque dérivation doit être pourvue d'une vanne, permettant d'interrompre le courant d'air pendant les arrêts ou en cas d'accident survenant à la génératrice ; les dégâts subis, par exemple, lors d'un court-circuit tendent, en effet, à s'étendre par le fait de la ventilation.

Le cube d'air à fournir aux générateurs puissants pour les refroidir convenablement est énorme. Pour rendre la chose évidente, il nous suffira de faire observer qu'un turbo-alternateur de 10,000 kw., fonctionnant à pleine charge avec un rendement normal, dégage par minute plus de 7,000 calories qu'il s'agit de dissiper.

Or, au voisinage des centrales, l'atmosphère est le plus souvent chargée de particules poussiéreuses ; si l'on n'y prenait garde, on constaterait bientôt une accumulation de poussières sur les bobinages et dans tous les espaces libres des machines, et cela d'autant plus que l'on cherche, en vue de diminuer le poids et le prix de ces dernières, à réduire les dimensions des espaces réservés à la ventilation, quitte à multiplier leur nombre. D'après certaines expériences effectuées à Greenwich — où l'atmosphère est cependant peu souillée — la quantité de poussières déposée par l'air traversant un gros turbo-alternateur pendant son service annuel atteindrait une cinquantaine de kilos. Dans les régions industrielles, le chiffre serait considérablement plus élevé.

L'encrassement de la machine aurait pour résultat de réduire fortement le refroidissement et de rendre, par conséquent, la ventilation inefficace. D'autre part, la projection continuelle sur les enroulements chauds de particules solides, entraînées à grande vitesse par le courant d'air, finirait par rendre plus ou moins poreuses

Digitized by Google

les matières isolantes et les prédisposerait à absorber de l'humidité pendant les arrêts. Telle serait, d'après M. Christie, la cause de certains courts-circuits inexpliqués, observés à la mise en marche de dynamos restées longtemps inactives.

Pour éviter ces graves inconvénients, on cherche à débarrasser l'air de ses impuretés au moyen de filtres appropriés. Ceux-ci sont ordinairement constitués de toiles tendues sur des cadres en bois et opposées au courant d'air. Tout en rendant d'incontestables services, les filtres à toiles ont de nombreux défauts. Outre leur encombrement, on leur reproche d'exiger de fréquents nettoyages qui nécessitent souvent un arrêt prolongé de la machine desservie ; ils se détériorent rapidement, occasionnant des frais d'entretien assez élevés. A cause de leur nature essentiellement inflammable et de leur situation en amont de la dynamo, ils offrent un grave danger d'incendie qui oblige à les installer de préférence en annexe au dehors. Quand ces filtres s'encrassent, la résistance offerte au passage de l'air augmente sensiblement et le fonctionnement devient défectueux. Leur efficacité n'est d'ailleurs pas absolue, car ils n'arrêtent pas les poussières les plus ténues et, à la longue, la machine se souille malgré tout.

On a eu l'idée de filtrer l'air par un procédé tout différent, en le faisant passer à travers un rideau serré d'eau tombant en pluie fine, et ce moyen semble réaliser un sensible progrès sur le précédent. A première vue, il peut sembler bizarre de songer à envoyer dans des bobinages à haute tension un courant d'air qui vient de traverser un écran d'eau. Nous allons voir que, moyennant quelques précautions, il n'y a là aucun danger à craindre et, au contraire, de sérieux avantages à trouver.

Disons d'abord deux mots de l'appareil employé. C'est

Digitized by Google

une large conduite horizontale en tôle galvanisée, de section rectangulaire et suffisante pour que la vitesse de l'air y soit faible ; au milieu est établi un système d'ajutages étroits et très rapprochés qui projettent, à l'encontre du courant d'air, un grand nombre de jets d'eau finement divisés ; la pluie serrée qui se produit ainsi a l'apparence d'un brouillard très dense. Ce rideau liquide précipite tout ce que l'air contient de particules en suspension. Pour débarrasser le courant d'air de la poussière d'eau qu'il pourrait entraîner, on le fait ensuite circuler par des espèces de chicanes en tôle galvanisée, d'où il passe directement à la machine à ventiler. Une petite pompe centrifuge, à moteur électrique de 1 à 3 HP, refoule continuellement vers les ajutages l'eau qui tombe dans le réservoir inférieur de l'appareil ; le niveau est maintenu automatiquement constant dans ce dernier par le jeu d'un flotteur commandant un robinet et d'un trop-plein. (V. fig. : *Electrical Engineering,* 26 juin 1913, p. 374 et XVI.)

La dynamo reçoit donc de l'air propre et frais ; cet air, sans être « mouillé », puisqu'il a déposé son excès d'eau dans les chicanes en tôle citées plus haut, est saturé d'humidité. Cette circonstance — qui se présente, d'ailleurs, souvent en hiver, surtout en cas de brouillard, quel que soit le filtre employé, — n'est pas nuisible. L'air s'échauffe, en effet, et se désature, par conséquent, en parcourant la machine en marche ; il n'y a donc pas lieu de craindre un dépôt d'humidité dans celle-ci. Il semble même plutôt avantageux, d'après certains praticiens, de lui fournir de l'air humide ; cela éviterait la détérioration des isolants par cette sorte de « cuisson », que l'on observe parfois dans les générateurs chauffant fort. On s'accorde, d'ailleurs, en Angleterre, à constater que l'isolement des alternateurs équipés avec filtres à eau s'est bien

Digitized by Google

maintenu. Il est toutefois recommandable de ventiler à l'air sec — la pompe étant arrêtée — à la mise en marche et aussi quelque temps avant l'arrêt de la machine.

Les avantages de ce nouveau type de filtre sont nombreux : encombrement relativement faible, surtout pour les grosses unités ; aucun danger d'incendie ; nettoyage extrêmement simple et rapide, ne nécessitant même pas l'arrêt du générateur ; frais d'entretien minimes ; résistance au courant d'air constante et très faible, donc puissance absorbée très réduite (inférieure, d'après M. Christie, travail de la pompe y compris, à celle demandée par un filtre à toiles équivalent). Les frais d'installation sont moins élevés que ceux d'un filtre à toiles pour les puissances dépassant environ 5,000 kw. Nous citerons, enfin, comme qualité essentielle du système, non seulement de purifier l'air d'une façon très satisfaisante, mais encore de le refroidir sensiblement avant son entrée dans la machine ; cette circonstance rend la ventilation plus efficace et permet d'augmenter notablement et sans danger la puissance débitée. On peut même, si l'on consent à compliquer l'appareil d'un petit réfrigérant, refroidir l'air insufflé au point de permettre un fonctionnement sans échauffement anormal sous une surcharge de 25 à 30 p. c. Ce dispositif pourrait donc rendre des services appréciables dans les centrales fortement chargées. Il conviendrait aussi dans les pays tropicaux ou en cas de chaleurs excessives.

On a justement fait observer qu'il serait rationnel de munir les diverses génératrices d'une centrale de couples thermo-électriques, faisant connaître à l'électricien du tableau la température atteinte par les machines. Mieux que le wattmètre, le thermomètre indiquerait la charge limite admissible ; cet appareil ne « mesurerait » pas, il est vrai, la charge à chaque instant — la dynamo n'attei-

Digitized by Google

gnant sa température de régime qu'à la longue, — mais puisque la sécurité de marche ne dépend que de la température atteinte par les matériaux, le thermomètre conviendrait parfaitement pour indiquer le moment à partir duquel la charge doit être limitée ou réduite.

D'importantes installations avec filtres d'air à jets d'eau existent actuellement, en Angleterre, et semblent donner toute satisfaction. L'une d'elle fournit 100,000 pieds cubes d'air par minute à un turbo-alternateur de 10,000 kw.

Le même dispositif serait évidemment applicable aux gros transformateurs.

Comme il compte déjà de nombreux partisans, ainsi que nous l'apprennent les débats du Congrès signalé au début de cette note, et qu'il est peut-être appelé à un réel développement, il nous a paru intéressant de l'exposer avec quelques détails.

C. VERLINDEN.

Digitized by Google

MÉMOIRE

621.187.5

Courbes caractéristiques d'une chaudière. (1)

(Suite)

SOMMAIRE : 1. Tracé des courbes caractéristiques d'une chaudière du type Lancashire, alimentée avec des charbons demi-gras. — 2. Remarques sur la fréquence la plus économique pour les nettoyages d'une chaudière, et sur les courbes d'égales puissances.

1. — Si on suppose un charbon ayant, sec et pur, une composition toujours identique, il resterait, pour le caractériser, deux éléments : sa teneur en eau et sa teneur en cendres.

D'autre part, avec une chaudière donnée, dont on laisse invariables la surface de grille et la surface de chauffe, il reste un élément dont on peut disposer : l'allure, c'est-à-dire la rapidité de combustion.

Nous nous sommes proposé de déterminer, en les séparant, *les influences respectives des trois variables indépendantes : humidité, cendres, allure*, sur les divers facteurs de la combustion et en particulier sur le plus important au point de vue économique : le coefficient de vaporisation.

Pour cela, nous nous sommes servis de charbons créés de toutes pièces par le mélange de fines lavées

(1) Voir *Bulletin de l'A.I. M.*, t. XIII, 1913, p. 301 (fasc. 7).

Digitized by Google

(0 à 10 millim.) avec des pierres de lavage de dimensions pareilles et qui provenaient du même menu.

Nous avons obtenu de la sorte des charbons dont la teneur en cendres variait dans de larges limites et dont la partie combustible (charbon sec et pur) avait à peu de chose près toujours la même composition, qui est celle d'un demi-gras :

Carbone	91,1 %
Hydrogène	4,4 »
Oxygène et azote. . . .	3,4 »
Soufre	1,1 »
	100,00 %

A la distillation ce charbon sec et pur donne :

Carbone fixe (coke pur). .	85,5 %
Matières volatiles	14,5 »
	100,00 %

et sa combustion dégage (pouvoir calorifique inférieur) :

$$8390 \frac{\text{calories}}{\text{kg}}.$$

La chaudière d'essai est du type Lancashire à 2 tubes foyers de 0,80 m. de diamètre, munis chacun de 6 tubes Galloway, qui présentent une surface totale de grille de 2,10 m², et une surface totale de chauffe de 75 m² — rapport 31,25. — La pression absolue de la vapeur dans tous nos essais fut toujours voisine de 6 atmosphères, et la température moyenne de l'eau d'alimentation à l'entrée de la chaudière fut toujours comprise entre 14 et 22°.

NOTATIONS. — Désignons par :

s la surface de grille,

S la surface de chauffe,

Digitized by Google

p le poids/temps de charbon sec et pur consommé,
p' le poids/temps de vapeur type produite,
$\rho = p'/p$ le coefficient de vaporisation,
x le rapport du poids des cendres au poids du charbon sec et pur dans le combustible employé,
y le rapport du poids de l'eau au poids du charbon sec et pur dans le combustible employé.

En résumé à l'allure p, un poids $(1 + x + y)$ kg de combustible contenant 1 kg de charbon sec et pur, est capable de transformer ρ kg d'eau prise à 0° C en vapeur à 6 atmosphères absolues.

Le coefficient de vaporisation brute est évidemment

$$\rho'' = \frac{\rho}{1 + x + y}$$

1 kg de vapeur-type représente le passage dans la chaudière de 655,063 calories, si le charbon pur et sec dégage 8390 calories, le rendement de la vaporisation sera

$$R = \frac{655{,}063}{8390}\,\rho = 0{,}078 \cdot \rho$$

Enfin la vaporisation par unité de temps et de surface de chauffe est :

$$p'/S = \left(\frac{s}{S}\right) \cdot \left(\frac{p}{s}\right) \cdot \rho$$

cette quantité est proportionnelle à la *puissance* fournie par la chaudière.

Nous avons renseigné la composition du charbon par le rapport de l'humidité et des cendres à la partie combustible (charbon sec et pur) et non à l'ensemble de la partie combustible et des impuretés : c'est la seule manière explicite de s'exprimer.

Digitized by Google

INFLUENCE DE L'HUMIDITÉ. — p et x *étant constants, comment* ρ *varie-t-il avec y ?* »

On peut se rendre compte que ces variations sont très faibles.

En effet, soit ρ_1 et ρ_2 les valeurs de ρ correspondant à deux valeurs différentes de y : y_1 et y_2 ; cela signifie que la combustion de :

$$(1 + x + y_1) \text{ kg contenant } \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ kg de charbon sec et pur} \\ x \text{ » de cendres} \\ y_1 \text{ » d'eau} \end{array} \right\} \begin{array}{c} \text{envoie dans l'eau} \\ \text{de la chaudière} \\ (655 \times \rho_1) \text{ calories} \\ \text{sur les 8390 calories} \\ \text{dégagées} \end{array}$$

et que la combustion de

$$(1 + x + y_2) \text{ kg contenant } \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ kg de charbon sec et pur} \\ x \text{ » de cendres} \\ y_2 \text{ » d'eau} \end{array} \right\} \begin{array}{c} \text{envoie dans l'eau} \\ \text{de la chaudière} \\ (655 \times \rho_2) \text{ calories} \\ \text{sur les 8390 calories} \\ \text{dégagées.} \end{array}$$

dans les deux cas les pertes ont été identiques, sauf une, celle qui provient, pour la plus grande part, de la chaleur de vaporisation de l'humidité du charbon, et qui est égale, dans le premier cas à $(537 \times y_1)$ calories, et dans le deuxième cas à $(537 \times y_2)$ calories.

Si R désigne la valeur moyenne des rendements dans les deux cas, on aura identiquement

$$655 (\rho_1 - \rho_2) = 537 (y_1 - y_2) \text{ R}$$

ou

$$\rho_2 - \rho_1 = \frac{537}{655} (y_1 - y_2) \text{ R}$$

on déduit de là que les variations ρ sont négligeables tant que y reste compris dans les limites commerciales.

INFLUENCE DE LA TENEUR EN CENDRES ET DE L'ALLURE. — « *Déterminer les variations de* ρ avec *x pour une valeur constante quelconque de* p » et « *déterminer les variations de* ρ *avec* p *pour une valeur constante quelconque de* x ».

Digitized by Google

Ce sont ces variations que nous avons déterminées expérimentalement. Elles résultent des tableaux récapitulatifs suivants :

Le tableau I reproduit les résultats obtenus au fur et à mesure de l'exécution des essais (1).

Le tableau II est déduit du précédent d'après les considérations suivantes :

Si on compare par exemple les essais des 14-8, 22-9, 6-10, 12-10, 19-10, où l'allure est approximativement la même $p/s \cong 43$ kgs/h. m², on obtient une première approximation de l'influence de x sur ρ pour l'allure considérée. De même, en rapprochant par exemple les essais des 8-12, 22-10, . . . , on obtient une approximation de l'influence de x sur ρ pour l'allure $p/s \cong 84$ kgs/h. m². On constate que ces influences sont sensiblement linéaires et égales :

$$\left(\frac{d\rho}{dx}\right)_{p = \text{const.}} \cong -5$$

quelle que soit la valeur constante de p, ρ diminue de 0,05 lorsque x augmente de 1 %.

Ceci nous a permis de ramener des cinq premiers essais à la valeur uniforme $x = 0{,}10$ dont ils s'écartaient peu ; de ramener de même les quatre suivants à la valeur $x = 0{,}20$, etc.

Dans le tableau II, où ces résultats sont renseignés, on a en outre tenu compte des corrections nécessitées par le fait que les essais sont différemment espacés des nettoyages périodiques de la chaudière.

Les diagrammes fig. 7 ne sont que la traduction du tableau II.

(1) Voir en note, à titre d'exemple, la feuille-résultat de l'un de ces essais.

Digitized by Google

Tableau I.

Date de l'essai.	Poids des cendres. Poids de charbon sec et pur. x	Poids de charbon sec et pur consommé. Temps × surface de grille. $p's$	Poids de vapeur-type produite. Poids de charbon sec et pur consommé. ρ
	%	kg heure et m²	
17-9-09	10,13	30,85	10,02
14-9-09	8,69	40,20	10,13
14-8-09	14,78	44,70	9,12
15-9-09	10,06	62,80	9,78
8-12-09	14,28	84,80	8,75
21-9-09	17,50	31,15	9,74
22-9-09	17,02	46,12	9,55
24-9-09	17,09	67,15	9,03
14-12-09	21,80	89,50	7,92
6-10-09	28,45	45,10	9,13
18-8-09	25,80	58,60	7,90
8-10-09	27,40	74,00	8,36
12-10-09	38,14	43,60	8,34
13-10-09	39,10	56,60	8,09
15-10-09	38,10	72,60	7,66
19-10-09	48,00	42,36	8,16
20-10-09	45,05	65,60	7,42
21-8-09	53,00	77,50	6,56
22-10-09	45,17	84,20	7,02

Digitized by Google

Tableau II.

Poids des cendres.	Poids de charbon sec et pur consommé.	Poids de vapeur-type produite.	Rendement de la vaporisation.	Poids de vapeur-type produite.
Poids du charbon pur et sec.	Temps et surface de grille.	Poids du charbon sec et pur consommé.		Temps et surface de grille.
x	p/s	ρ	R	p/S
%	kg/heure m²		%	kg/heure m²
10	30,85	10,17	79,25	10,05
	40,20	10,23	79,80	13,18
	44,70	10,20	79,50	14,60
	62,80	9,90	77,20	19,90
	84,80	9,20	71,25	25,00
20	31,15	9,79	76,40	9,79
	46,12	9,58	74,75	14,13
	67,15	9,10	71,00	19,50
	89,50	8,25	64,35	23,65
30	45,10	9,34	72,85	13,47
	58,60	8,50	66,30	15,95
	74,00	8,54	66,60	20,25
40	43,60	8,59	67,10	12,00
	56,60	8,40	65,50	15,20
	72,60	7,94	62,00	18,44
50	42,35	8,46	66,00	11,48
	65,60	7,58	59,20	15,94
	77,50	7,20	56,20	17,85
	84,20	7,23	56,40	19,50

Digitized by Google

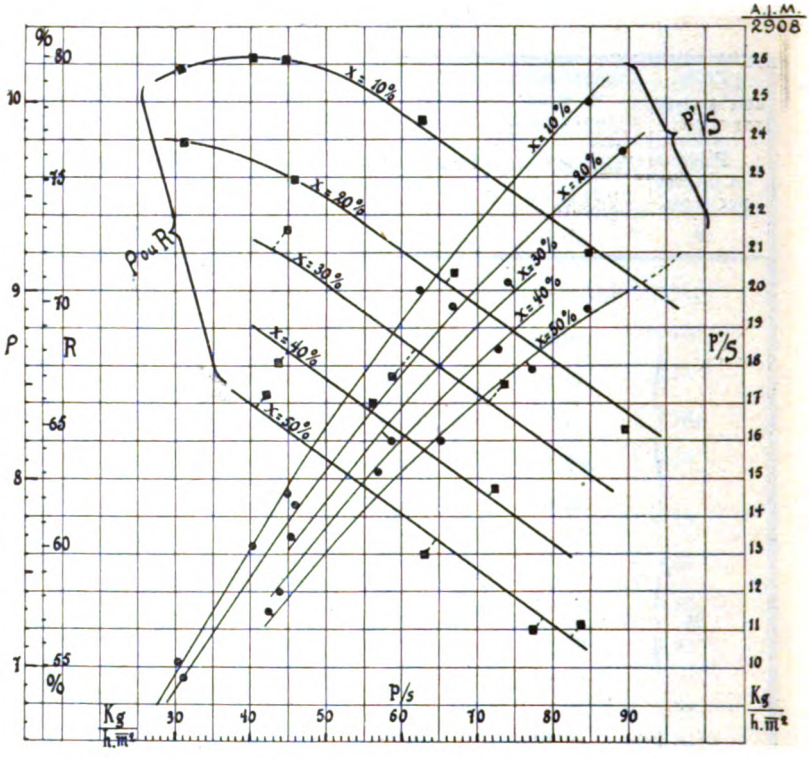


Fig. 7.

Conclusions. — La concordance des résultats est remarquable surtout si on tient compte de ce que notre chaudière faisait partie d'une batterie alimentant une machine d'extraction, dont la demande de vapeur est irrégulière. Pour aucun de ces essais, la chaudière ne fut distraite de son service journalier. Cette concordance est une confirmation expérimentale de ce que nous savions déjà par l'analyse : *qu'un essai de chaudière est une mesure industrielle susceptible de la même précision que tout autre essai de machine.*

Digitized by Google

Et si on songe que l'industriel peut gagner par l'étude de la chaudière et du charbon, au moins autant que par l'étude du moteur, on ne peut comprendre l'indifférence dans laquelle on laisse souvent le service de la chauffe.

Les diagrammes que nous avons relevés n'ont de signification précise que pour les charbons qui se rapprochent par leur composition de celui que nous avons expérimenté (c'est-à-dire pour nos demi-gras bien caractérisés) et pour les chaudières à foyers intérieurs.

Il serait très intéressant et utile de faire les mêmes déterminations pour les charbons gras, les charbons maigres, les gaz de hauts-fourneaux ou de fours à coke et dans des chaudières de types différents.

Ces déterminations combinées apporteraient, ce n'est pas douteux, une sûreté complète dans l'accord des garanties.

Les quelques exemples suivants montrent le parti qu'on peut tirer de diagrammes tels que ceux que nous avons établis.

A) Un menu demi-gras contenant $x = 15$ % de cendres réalise, à l'allure $p/s = 48$ kg/h. m² de grille : $\rho = 9{,}9$. Si à un moment donné sa teneur en cendres atteint $x = 25$ % (soit 21 % seulement avec les notations habituelles), et s'il doit être brûlé à l'allure $p/s \cong 100$ kg/h. m² quel coefficient de vaporisation brute pourra-t-il réaliser ?

Les diagrammes montrent qu'on pourra garantir tout au plus :

$$\rho \cong \frac{7{,}8}{1 + 0{,}25} = 6{,}2 \text{ en charbon sec.}$$

B) Un industriel est dans l'obligation de faire produire à ses chaudières (supposées du même type que la nôtre) 25 kgs de vapeur type par heure et m² de chauffe, sous peine de ne pouvoir soutenir la marche de son usine.

Digitized by Google

D'autre part, le tirage dont il dispose limite la vitesse de combustion à 90 kgs de charbon sec et pur par heure et m² de grille.

Les diagrammes montrent que la marche de l'usine tombera chaque fois que le charbon considéré dépassera $x \cong 13$ à 14 % (soit 11 à 12 seulement suivant l'expression habituelle). Ce sera la source de réclamations inévitables dès qu'on fournira à cet industriel autre chose que du charbon très pur.

Au contraire, si cet industriel possédait un nombre de chaudières suffisant pour lui permettre de ne demander que 15 kgs de vapeur par heure et m² de chauffe à chacune d'elles, les mêmes diagrammes montrent que la marche de l'usine serait encore possible avec du charbon très cendreux (jusqu'à une teneur $x \cong 28$ %).

c) Plaçons-nous au point de vue d'un propriétaire de chaudière et supposons pour plus de généralité qu'il s'agisse d'une installation à établir : on a besoin de 7500 kg de vapeur par heure, on s'est arrêté à un type de chaudière et il reste à choisir le nombre de ces chaudières, c'est-à-dire la surface de chauffe totale. Ainsi, si les chaudières ont 100 m² de surface de chauffe, on pourrait en placer trois, auxquelles on ferait produire 25 kg de vapeur par heure et m² de chauffe, ou en prendre cinq auxquelles on ne demanderait que 15 kg/h. m². Quelle est la solution la plus avantageuse ?

A moins qu'il ne s'agisse d'une installation temporaire, le coût de l'installation (frais de premier établissement) ne vaut que par *le service d'intérêt* du capital engagé.

De ce côté, l'avantage est naturellement au petit nombre de chaudières.

Le service d'amortissement est aussi généralement en faveur du petit nombre de chaudières, bien que la différence entre les campagnes compense ici en partie la différence des capitaux engagés.

Digitized by Google

Le service d'entretien est sensiblement le même des deux côtés. En outre le nettoyage d'une chaudière est un ennui bien plus grave quand on n'a qu'un petit nombre d'unités dont la marche est déjà forcée.

Les frais de personnel sont en faveur de la grande surface de chauffe, car la vaporisation totale par unité de temps devant être la même des deux côtés et le rendement étant supérieur dans le cas des cinq chaudières, le poids de charbon à jeter par unité de temps sera moindre : il faut moins de personnel pour desservir et surveiller les cinq chaudières ménagées que les trois chaudières forcées.

Enfin le facteur essentiel, la consommation de charbon, sera bien plus faible dans le cas de la grande surface de chauffe que dans le cas de la petite.

En supposant que les chaudières considérées soient du même type que la nôtre et que le charbon soit analogue à celui que nous avons expérimenté, les diagrammes obtenus montrent qu'avec le charbon pour lequel $x = 10\,\%$, par exemple, le rendement sera

80 % dans le cas des 5 chaudières.
72 » » » 3 »

En outre, nous avons montré que dans le cas d'un petit nombre de chaudières, on s'astreint à ne brûler que des charbons très purs, sous peine de ne pouvoir suffire à la demande de vapeur. On se prive donc de la possibilité de brûler des combustibles cendreux même dans le cas où on y trouverait avantage.

Ces considérations économiques sont nettement en faveur d'une surface de chauffe largement prévue. Et l'intérêt de l'industriel se confond ici avec l'intérêt du charbonnier, car la vente acquiert d'autant plus l'élasticité que la chauffe éprouve plus de latitude.

Digitized by Google

INFLUENCE DE L'ENCRASSEMENT SUR LE COEFFICIENT DE VAPORISATION. — Deux essais ont été effectués les 13-11 et le 16-11-09, immédiatement après un nettoyage de la chaudière ; ces deux essais ont été reproduits les 13-1 et 15-1-09, c'est-à-dire immédiatement avant le nettoyage suivant :

Date de l'Essai		x	p/s	ρ
		%	kg/h. m²	
13-11-09	chaudière	9,77	46,65	9,83
16-11-09	nettoyée	11,22	46,40	9,79
13- 1-10	chaudière	10,49	46,40	9,33
15- 1-10	encrassée	10,23	47,55	9,35

La matière combustible du charbon était la même dans les deux cas, et nous pouvons ramener les valeurs de x et de p/s aux valeurs uniformes :

$$x = 0{,}10 \text{ et } p/s = 46{,}5 \text{ kg/h. m}^2.$$

On obtient définitivement :

Date de l'Essai		x	p/s	ρ
		%	kg/h. m²	
13-11-09	chaudière			9,82
16-11-09	nettoyée			9,85
		10	45,6	
13- 1-10	chaudière			9,35
15- 1-10	encrassée			9,36

On peut conclure que la perte due à l'encrassement de la chaudière a été de :

Digitized by Google

$$\left|\frac{d\rho}{dt}\right| = \frac{0{,}5}{2 \text{ mois}} = 0{,}0082/\text{jour}.$$

FRÉQUENCE LA PLUS ÉCONOMIQUE DES NETTOYAGES. — Le facteur $|d\rho/dt|$ est également utile à connaître pour l'industriel, car il permet de déterminer à quels intervalles il convient de faire succéder les nettoyages de la chaudière pour se placer dans les conditions les plus économiques.

En effet soit :

A le poids/temps de vapeur type demandée à une chaudière,

a le prix poids de charbon sec et pur consommé,

B le coût d'un nettoyage,

ω la valeur de $d\rho/dt$ avec la chaudière, l'allure et le combustible considéré,

ρ_0 la valeur initiale de ρ avec la chaudière, l'allure et le combustible considéré,

T le temps consenti entre deux nettoyages consécutifs d'une chaudière,

il faut rendre minima la somme

$$u = \frac{B}{T} + \frac{1}{T}\left[\int_0^T a\frac{A}{\rho}\,dt - \int_0^T a\frac{A}{\rho_0}\,dt\right]$$

or, si on tient compte de ce que $\rho = \rho_0 - \omega t$, le second terme peut s'écrire :

$$\frac{aA}{T}\int_0^T\left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0}\right)dt = \frac{aA}{T}\int_0^T\frac{\rho_0 - \rho}{\rho_0\rho}\,dt = \frac{aA}{T}\int_0^T\frac{\omega t}{\rho_0(\rho_0 - \omega t)}\,dt$$

$$\cong \frac{\omega a A}{T\rho_0^2}\int_0^T t\,dt = \frac{\omega a A}{2\rho_0^2}\,T$$

On a donc

$$u = \frac{B}{T} + \frac{\omega a A}{2\rho_0^2}\,T.$$

Digitized by Google

« *La perte journalière qu'entraine l'encrassement de la chaudière est une fonction croissante, linéaire, de la durée qui sépare les nettoyage ; les frais journaliers qu'entraînent les nettoyages est une fonction décroissante, hyperbolique, de cette durée* » (fig. 7).

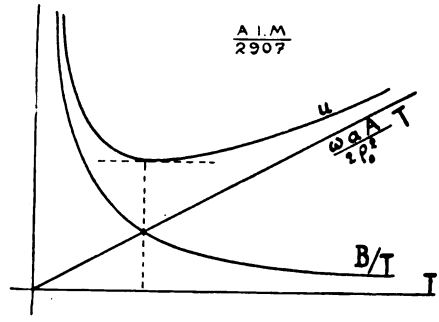


Fig. 8.

Il s'ensuit que les frais journaliers totaux passent par un minimum pour

$$\frac{du}{dT} = -\frac{B}{T^2} + \frac{\omega a A}{2 \rho^2_0} = 0,$$

c'est-à-dire pour

$$T = \sqrt{2}\, \rho_0 \sqrt{\frac{B}{\omega a A}}$$

Il se fait que cette valeur correspond précisément à l'intersection des deux courbes B/T et $\frac{\omega a A}{2 \rho^2_0}$ T.

Des facteurs qui entrent dans la formule précédente, c'est le coût d'un nettoyage B, qui peut subir le plus fortement l'influence des conditions économiques du moment, parce qu'il contient un terme, le coût de la main-d'œuvre, qui est onéreux en temps de grande activité industrielle, non seulement par suite des salaires élevés, mais surtout parce que le travail des ouvriers

Digitized by Google

consacrés au nettoyage de la chaudière est bien perdu pour la production ; au contraire, en temps de « faiblesse » le coût de cette main-d'œuvre peut tomber à peu de chose, si on n'a pas l'emploi constant de ses manœuvres. Les autres facteurs A, ω, ρ_0, a subissent aussi, quoique plus faiblement, l'influence des conditions économiques. Mais il est curieux d'observer que ces facteurs s'unissent pour compenser par leurs variations l'influence contraire du facteur B. En effet, si B augmente, en temps de prospérité, A augmente d'autre part, parce que, alors, on aura souvent besoin de forcer la marche des chaudières, ce qui, en même temps, accroît ω et diminue ρ_0 ; enfin a de son côté est élevé puisque la demande de combustible surpasse l'offre.

Cette dernière circonstance, en obligeant à brûler des charbons moins choisis, accentuera encore les variations signalées de P_0 et de ω.

On le voit T est relativement indépendant du moment.

Exemple : Si

A = 750 kg/heure, soit pendant 12 heures sur 24 une vaporisation de 1500 kgs-heure ;

a = 24 francs/tonne ;

B = 100 francs ;

ω = 0,3/mois ;

ρ_0 = 10

la formule donne

$$T = \sqrt{2} \cdot 10 \sqrt{\frac{100 \text{ frs}}{\frac{0{,}01}{\text{jour}} \cdot \frac{24 \text{ frs}}{\text{tonne}} \cdot \frac{0.750 \times 24 \text{ tonnes}}{\text{jour}}}}$$

$$\cong 68 \text{ jours.}$$

Courbes d'égales puissances d'une chaudière. — Pour une chaudière et un combustible donnés, le rendement varie avec l'allure et nous avons vu que la courbe s'abaisse constamment vers l'axe des abscisses dans la

Digitized by Google

région où nous avons pu l'observer avec les moyens de tirage limités dont nous disposions et pour les charbons expérimentés.

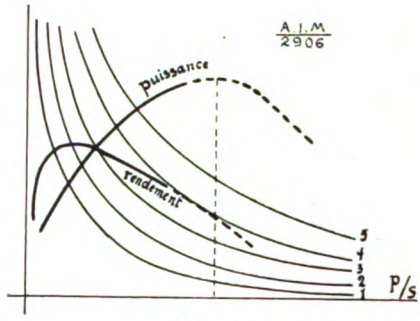


Fig. 9.

D'autre part, la puissance fournie par la chaudière est proportionnelle au procuit de R et de p/s de sorte que les courbes d'égales puissances sont des hyperboles ayant les axes coordonnées pour asymptotes. Lorsque l'allure croît, on voit que la courbe du rendement coupe d'abord des hyperboles de plus en plus « puissantes » : la puissance fournie par la chaudière croît avec l'allure et nous l'avons observé en relevant expérimentalement p'/S en fonction de p/s — (car p'/S est proportionnel à la puissance). Mais nous n'avons pu suivre ces courbes que dans une région relativement peu étendue ; si nous avions pu accroître suffisamment le tirage, nous aurions atteint une allure pour laquelle la courbe du rendement devenait tangente à une hyperbole, qui représente la puissance maxima que peut fournir la chaudière avec le charbon considéré. Au delà de cette allure la puissance décroît, du moins si la courbe du rendement continue à présenter sa concavité vers le bas. La courbe figurant la puissance serait donc une courbe en $\cap$. Dans ce cas, pour une puissance donnée à fournir par la chaudière, on aurait le

Digitized by Google

choix entre deux allures, si on n'est pas arrêté par l'insuffisance du tirage. Ces deux allures correspondent à des rendements inégaux et on choisirait toujours la plus faible, d'autant qu'elle est souvent la seule réalisable pratiquement.

On remarquera aussi que la plus grande puissance que peut fournir une chaudière avec un combustible donné ne correspond pas, en général, au rendement maximum.

Les courbes caractéristiques, c'est-à-dire la courbe du rendement (ou des kg de vapeur-type par kg de combustible) et la courbe de la puissance (ou des kg de vapeur par heure et m^2 de chauffe), que nous avons relevées en partie, pour notre chaudière et pour un combustible solide, seraient particulièrement utiles à connaître dans le cas de combustibles gazeux, comme les gaz naturels ou de gazogène, de fours à coke ou de hauts-fourneaux.

M. BOUFFART.

Digitized by Google

ANNEXE

Spécimen des feuilles dressées pour chacun de nos essais.

Date de l'essai		8-12-09
Date la mise à feu de la chaudière		10-11-09
Moyennes déduites des diagrammes fournis par les appareils enregistreurs.	Dépression en m/m d'eau au registre	16,62
	Dépression en m/m d'eau aux foyers	6,0
	Température de l'air froid	8,2° C.
	Température des gaz brûlés au registre	415,0° C.
	Température de l'eau d'alimentation	14,92° C.
	Pression absolue de la vapeur produite	6,06 kg
Durée effective de l'essai		5,33 h.
Nombre de charges		61
Nombre de crochetages		29
Poids total du charbon brut dépensé		1350 kg
Poids correspondant de charbon sec (toutes corrections faites)		1241,50 kg
Combustion de charbon sec par heure et m² de surface de grille		97,0 kg
Poids des cendres, 86 kgs, et des escarbilles, 63 kgs, recueillies en deux nettoyages.		
Poids total des résidus		152 kg
Pourcentage du poids des résidus par rapport au poids total de charbon sec		12,23 o/o
Poids total de carbone contenu dans les résidus		27,7 kg
Pourcentage de carbone résiduel par rapport au poids total de charbon sec		2,23 o/o
Composition moyenne, en volume, des gaz brûlés secs CO^2		11,5 o/o
» » » » » » » CO		0,2 o/o
Poids total d'eau vaporisée, eau prise à 0 degré et vaporisée à 6 atm. abs. (toutes corrections faites)		9500 kg
Vaporisation par heure et m² de surface de chauffe		23,75 kg
Vaporisation par kg de charbon sec (eau à 0 degré, vapeur à 6 atm. abs.)		7,65 kg
Observation : Hauteur moyenne des feux		14 cm.

Digitized by Google

CHRONIQUE.

Le but et l'œuvre de la Commission Électrotechnique internationale.

Ce discours (1) a été rédigé à la suite de la demande faite en janvier 1912 par le Comité de rédaction de l'Institution of Electrical Engineers, qu'un rapport fût présenté sur l'objet de l'organisation connue sous le nom de Commission Électrotechnique internationale et sur les travaux qu'elle a déjà accomplis. Pour faire un exposé de cette organisation, il est bon de présenter d'abord quelques observations générales sur le développement antérieur des choses de l'Électricité, ainsi que sur les événements passés qui ont conduit à la formation de cette Commission.

* * *

Il est de toute évidence que plus une science progresse et plus ses applications industrielles se développent, plus aussi s'accroissent les idées scientifiques et avec elles les termes techniques qui servent à les exprimer. Mais, dans chaque pays civilisé, il se produit des avances indé-

(1) Ce discours a été lu devant l'*Institution of Electrical Engineers*, le 19 décembre 1912.

Digitized by Google

pendantes l'une de l'autre dans la découverte scientifique et dans l'invention technique. Et, comme l'œuvre de pionniers indépendants qui surgissent de temps à autre est le double résultat du génie individuel et du milieu où il se développe, cette œuvre se trouve nécessairement exprimée dans des termes qui sont empruntés des idiosyncrasies de la langue du pays où la découverte ou l'invention ont vu le jour. Il s'ensuit nécessairement que, dans les diverses nations, des différences d'usage se produisent dans l'emploi et la notation des termes scientifiques, de même que dans les méthodes adoptées pour la description et la spécification du matériel et des machines que le progrès scientifique a fait naître.

* * *

D'autre part, dans le progrès de la civilisation en général et le développement des ressources nationales des divers peuples, le plus puissant facteur a toujours été et sera toujours l'échange des produits naturels et des objets manufacturés.

En un mot, le commerce, cet échange direct ou indirect de la production marchande entre les nations, a été la clef de leur développement matériel. Les grandes industries mondiales, qu'il s'agisse de tissus ou de machines, d'acier ou de produits chimiques, de conserves alimentaires ou de moyens de transport, toutes ces industries se sont développées d'une façon étonnante à notre époque ; et cette expansion illimitée, qui a pour base essentielle la concurrence commerciale entre les populations des différentes parties du globe habitable, est à la fois le résultat du progrès scientifique dans le passé et le stimulant vers un nouvel avancement scientifique dans l'avenir. Toutefois, l'unification des bases scientifiques dans l'avenir. Toutefois, l'unification des bases scientifi-

Digitized by Google

ques du commerce est loin d'être complète. Des différences de races et de langages sont beaucoup trop profondément enracinées pour qu'il y ait actuellement une possiblité quelconque d'accord universel qui abolirait les différences d'usages. Il est vrai que toutes les nations ont maintenant accepté un étalon d'or comme base des échanges et qu'un système postal universel est à peu près achevé. Mais sur d'autres questions, les nations sont loin d'avoir le même point de vue. Le rêve d'une langue universelle est aussi chimérique que celui d'un impossible et barbare royaume d'Utopie où règnerait l'égalité des richesses. Même pour les choses d'un accomplissement immédiat possible, les nations les plus avancées sont les plus conservatrices. Tandis que tous les autres pays civilisés des deux hémisphères ont adopté le système monétaire décimal, l'Angleterre conserve un système mixte, à la fois décimal et duodécimal, à son grand désavantage. Dans une question aussi simple que celle de la mesure de la température, les habitants de la Grande-Bretagne, à l'exception de la moitié des hommes de science, ont recours à l'échelle irrationnelle et arbitraire imaginée par un Fahrenheit, de Dantzig, tandis que la plupart des nations européennes ont adopté l'échelle plus rationnelle (quoique arbitraire aussi) inventée par Celsius d'Upsala. Aucune d'elles n'a encore adopté l'échelle rationnelle électrodynamique ou absolue, proposée il y a soixante-quatre ans par lord Kelvin. Ce sont les météorologistes qui barrent la route à un accord international sur ce sujet. Néanmoins, il est foncièrement vrai que le progrès humain et le développement des relations commerciales dépendent de l'unification dans la pratique. Où en serions-nous si chaque ville de l'Empire avait son système monétaire propre, chaque contrée son système spécial de poids et mesures, chaque chemin de fer sa

Digitized by Google

largeur de voie particulière? Dans les débuts de toute nouvelle entreprise, des différences de pratique, des différences d'étalons, se produisent inévitablement. Puis le commerce intervient, amenant de plus larges débouchés. Avec l'élargissement et le développement industriel qui s'ensuit, l'unification se fait inévitable. Prenons-en seulement un exemple dans une question familière à chacun des membres de cette institution.

Dans les premiers jours de l'art de la Télégraphie, l'ingénieur éprouva le besoin d'exprimer numériquement les valeurs des résistances opposées au passage du courant par les instruments et les piles utilisés sur les lignes télégraphiques. Ayant besoin d'une unité pour exprimer de telles valeurs, quel étalon aurait pu être plus naturellement adopté qu'une certaine longueur, un « mile », ou un pied, de l'espèce particulière de fil qui était employé couramment? Et c'est ainsi que, vers 1850 ou 1860, l'ingénieur anglais des Télégraphes se servait, pour exprimer la résistance de ses bobines et de ses batteries de « miles » de fil de cuivre n° 16, et l'ingénieur français des Télégraphes, de kilomètres en fil de fer de 4 millimètres de diamètre. C'est alors que Jacobi, en Russie, proposa (1) comme étalon un fil de cuivre de 1 mètre de longueur et de 1 millimètre de diamètre. Werner von Siemens, en Allemagne, proposait de même (2) comme son unité une colonne de mercure de 1 mètre de longueur et 1 millimètre carré de section normale. Toutes ces unités arbitraires furent plus ou moins employées, entraînant de la confusion, car leurs valeurs différaient notablement de l'un à l'autre.

Prenons un autre exemple où la coordination est encore

(1) *Comptes rendus*, vol. 33, p. 227, 1851.

(2) *Poggendorff's Annalen*, vol. 110, p. 1, 1860.

Digitized by Google

très imparfaite. James Watt eut le génie d'apercevoir que la puissance d'une machine doit nécessairement être exprimée en fonction du travail effectué dans un temps donné ; et, ayant besoin d'une unité, il proposa le « horse-power » qu'il définit par rapport aux unités de poids anglaises comme 33000 ft-lb par minute (à Londres), c'est-à-dire $7{,}46071.10^9$ ergs par seconde ([1]), ou 746,071 watts. Mais lorsque les ingénieurs du continent recherchèrent une mesure équivalente pour exprimer la puissance de leurs machines, ils durent naturellement le faire en partant du mètre et du kilogramme, et, pour éviter des fractions gênantes, ils adoptèrent la valeur 75 kilogrammètres par seconde (à Paris) comme celle la plus approchée, en chiffres ronds, de 550 ft.-lb. par seconde, et ils appelèrent cette unité *cheval-vapeur* ; celui-ci vaut $7{,}3588.10^9$ ergs par seconde, ou 735,88 watts. Il n'y a certes pas équivalence entre le cheval-vapeur et le horse-power ; le premier est inférieur de 1,386 pour cent au second. A l'heure actuelle, nous en sommes encore à essayer de nous débarrasser de ces deux unités arbitraires, en vue de pouvoir adopter le kilowatt international comme unité de puissance.

* * *

La première tentative vers l'unification des mesures

(1) Ces valeurs sont celles données par le *Dictionary of Measures* de Clarck (1891), où la livre a pour valeur 453,5926 grammes, le pied 30,47945 centimètres, et la constante de la gravitation 981,17 à Londres et 980,94 à Paris. Dans les Tables de conversion de Carl Hering (1904), le horse-power figure comme $7{,}4560.10^9$ ergs par seconde, le *cheval-vapeur* comme $7{,}35448.10^9$; la livre était prise égale à 453,5924277 gr., le pied à 30,4800 centimètres, et la constante de la gravitation à la valeur *moyenne* 980,5966. Comme l'accélération de la pesanteur à Berlin est de 981,27, le *Pferd-Kraft* allemand de 75 kilogrammètres par seconde est équivalent à 736,115 watts.

Digitized by Google

électriques a été faite par les pionniers de la Télégraphie sous-marine, dont les méthodes de mesures électriques étaient beaucoup plus scientifiques aux environs de 1855 que celles des hommes de science professionnels. Tout le monde rend hommage à Gauss et Weber pour leurs propositions d'un système absolu de mesures magnétiques et électriques; mais, l'origine de notre système actuel d'unités internationales date d'un mémoire présenté à la réunion de la « British Association » en 1861, par deux distingués ingénieurs télégraphistes, sir Charles Bright et M. Latimer Clark, qui furent l'un et l'autre des présidents honorés de cette Institution dans ses premiers jours. Ce mémoire amena la création du Committee on Electrical Standards of the British Association (1), cet historique comité qui, au cours de son travail de six années, formula des définitions pour l'*ohm*, le *volt*, le *coulomb*, le *farad* et le *weber* (actuellement appelé *ampère*), et donna au monde la première détermination de la valeur de l'étalon de résistance, l'*ohm*. Nous saluons les noms de Kelvin, Clerk-Maxwell, Fleeming Jenkin, Grylls Adams et Carey Foster pour leurs travaux dans cet effort collectif; et nous ne devons pas oublier de dire qu'ils se réjouirent de recevoir des conseils de Werner von Siemens pour la fixation de la grandeur de l'étalon, et de Matthiessen pour le choix de la matière — alliage de platine et d'argent — devant servir à sa construction. Mais avec le cours des années, le besoin se faisait sentir d'une précision plus grande comme d'une acceptation plus générale des unitsé choisies. Voici qu'à l'industrie, première en date, de la télégraphie, était venue se joindre celle de la téléphonie et la naissance de l'éclairage électrique apparaissait comme un nouveau champ d'activité commerciale. Une

(1) *Lumière Electrique*, 9 août 1913, p. 179.

Digitized by Google

Commission spéciale de la Chambre des Communes fit une enquête, en 1879, sur les questions légales que soulevait la fourniture publique de l'énergie électrique. De grands développements, mettant en jeu de vastes intérêts commerciaux, étaient sur le point de se produire.

* * *

La législation était imminente. Les temps étaient révolus. Et c'est ainsi que les années 1881 et 1882 virent se produire trois événements importants : deux d'entre eux immensément favorables, le troisième désastreux. Le premier de ces événements fut l'Exposition d'Électricité à jamais mémorable, de Paris ; le deuxième, le Congrès International des Électriciens, de Paris ; le troisième, l'adoption de l' « Electric Lighting act » de M. Chamberlain, qui a mis l'industrie par terre pour des années et qui a dû être rapporté dix ans plus tard.

Le Congrès de Paris de 1881, le premier de son genre, fut véritablement international : ce fut, en effet, la réunion d'un corps de délégués envoyés officiellement soit par des ministères d'États, soit par des institutions scientifiques d'une autorité reconnue par les différentes nations ; et les délibérations de ce Congrès furent présidées par le ministre français des Postes et des Télégraphes. Les vice-présidents étrangers furent lord Kelvin, signor Govi et le professeur Hermann von Helmholtz, tandis que Werner von Siemens, du Bois Reymond, Mascart, Clausius, Wiedemann, lord Moulton, Rowland et Eric Gerard firent partie des délégués présents. Il se manifesta à ce Congrès une forte tendance à l'abandon de l'unité de résistance de la British Association, en faveur de l'unité Siemens, la colonne de mercure de 1 mètre de longueur. On avait eu connaissance par des mesures

Digitized by Google

faites par Joule, Rowland, Mascart, H.-F. Weber, Roiti et lord Rayleigh, que la valeur numérique de l'unité B. A. présentait une erreur d'un léger pourcentage par rapport à celle de l'« ohm » théorique. Ce fut l'occasion d'un débat très chaud ; mais la rupture fut évitée par un ajournement opportun, au cours duquel, grâce aux efforts de M. Mascart et de lord Moulton, un compromis fut ménagé en vue d'accepter l'ohm de la British Association, mais de le représenter d'une manière concrète par une colonne de mercure d'une longueur appropriée, dont la spécification précise serait à fixer après les nouvelles recherches d'une conférence ajournée à l'année suivante. Les noms des unités électriques — *ohm*, *volt*, *coulomb*, et *farad* — furent adoptés, mais le nom de l'unité de courant fut, sur la proposition de von Helmholtz, changé de *weber* en *ampère*, en l'honneur du grand savant français. C'est ainsi que l'accord international sur les unités fut obtenu grâce à des concessions mutuelles. La Commission chargée de déterminer l'ohm se réunit en 1882, s'ajourna à 1884, et adopta alors, pour les dix années suivantes, comme représentation de l'ohm, une colonne de mercure de 106 centimètres de longueur, bien que l'on sût déjà que la valeur exacte était plus voisine de 106,3 centimètres. Le second Congrès de Paris, celui de 1889, adopta le *watt* et le *joule*, ainsi que l'unité de self-induction de 109 centimètres, ou un cadrant terrestre. En décembre 1890, le Board of Trade nomma un Comité consultatif formé de deux membres de chacune des institutions suivantes : Board lui-même, General Post-Office, Royal Society, British Association et Institution of Electrical Engineers ; ce Comité devait proposer au Board l'adoption sous forme législative des dénominations des différents étalons électriques fixés en 1889. Parmi les membres de ce Comité, qui siégea de janvier à juillet 1891, nous trouvons les

Digitized by Google

noms de lord Kelvin, lord Rayleigh, Dr Glazebrook, professeur Carey Foster et professeur Ayrton. Les travaux aboutirent à l'Order in Council d'août 1894, qui a donné force de loi en Grande-Bretagne aux étalons conservés au Board of Trade de l'*ohm*, du *volt* et de l'*ampère*.

***

Tout ce qui s'est passé depuis 1889 en fait d'unités a eu lieu en vue d'une spécification plus précise de leurs valeurs. Au congrès de la British Association d'Edimbourg (1892), la longueur de la colonne de mercure fut affirmée de nouveau être de 103,3 cm. à 0° C. ; mais, au lieu de donner sa section transversale, on déclare que la masse du mercure devait être de 14,4521 grammes-masse. Au congrès international de Chicago, en 1893, les cinq unités fondamentales furent reconnues de nouveau, mais avec l'adjectif « international » pour accompagner chacune d'elles. Le nom « henry » fut attribué à l'unité de self-induction, et le *joule* et le *watt* furent définis comme unités respectives de travail et de puissance dans le système centimètre-gramme-seconde, indépendant de toute quantité électrique quelconque. Le troisième congrès de Paris, celui de 1900, ajouta le nom de *maxwell* et de *gauss* pour désigner respectivement les unités de flux et d'intensité de champ magnétique.

***

Les différentes nations cependant n'avaient pas posé un plan uniforme pour donner force de loi aux diverses résolutions des congrès. Quelques-unes avaient déjà ratifié les propositions premières ; d'autres avaient attendu des résultats plus certains ; et quoique la discordance fût à ce moment peu accentuée, elle l'était assez cependant pour

Digitized by Google

faire craindre des difficultés pour l'avenir. Mais sur ces entrefaites une nouvelle et puissante influence se fit sentir. La création de la Reichsanstalt à Berlin, avec ses laboratoires d'étalonnage et son personnel d'une haute compétence, fut suivie par des créations du même genre dans d'autres pays. La France, avec son Laboratoire Central d'Electricité, l'Angleterre, avec son National Physical Laboratory de Bushy House, les Etats-Unis, avec leur Bureau of Standards, possèdent ainsi maintenant des institutions de premier ordre pour la détermination scientifique des étalons électriques et leur comparaison mutuelle, ainsi qu'avec les unités qu'ils représentent. Des conférences officieuses entre les représentants des grands laboratoires ont lieu sans cesse. L'une d'elles fut tenue à Charlottenburg en octobre 1905, sous la présidence de M. Mascart. Parfois un représentant d'un laboratoire se rend pour un mois ou deux dans un autre laboratoire, et des essais et comparaisons d'étalon sont faits alors en commun. Lorsque trois ou quatre grands laboratoires, après des comparaisons de ce genre, tombent d'accord, des doutes seraient malvenus et et il n'y a plus guère de raison à un atermoiement. C'est ainsi que la question longuement controversée des unités a été pratiquement écartée du fond même des discussions du congrès, et a cessé de dépendre de l'opinion des professeurs d'universités.

* * *

La dernière conférence internationale des Unités et Etalons Electriques, qui se réunit à Londres en 1908, et qui ne se composa que de délégués de gouvernements, n'a fait qu'enregistrer les définitions des « Unités internationales » ; et quoique dans sa sagesse collective elle ait décidé, à la majorité des votants, d'ajouter deux zéros au

Digitized by Google

nombre de 106,3 qui représente en unités de mercure la valeur de l'ohm — nombre qu'on sait avec une quasi-certitude être inexact d'environ 1/5 000 —, elle a ménagé cependant une porte de sortie en créant un comité permanent chargé de s'occuper de cette question lorsque les grands laboratoires auraient terminé leurs comparaisons définitives.

Il n'est pas besoin d'en dire davantage sur ce travail de longues années [1]. Les unités purement scientifiques peuvent être considérées comme fixées pour les besoins de la pratique par la concordance des résultats et la collaboration des grands laboratoires.

* * *

Mais si la question de la fixation des unités est ainsi passée au second plan, comme une cause jugée, d'autres questions d'une importance plus commerciale sont venues graduellement se mettre au premier plan ; et comme elles embrassent à la fois des points de vue nationaux et des points de vue internationaux, une nouvelle organisation est devenue nécessaire pour les résoudre. On s'est préoccupé d'abord des différences de langages et d'usages dans la description et la spécification des appareils et des machines. Avec le développement des grosses industries électriques, ces différences sont devenues plus importantes. Les machines électriques et les applications de l'électricité sont devenues un facteur tellement essentiel dans tous les projets des ingénieurs, qu'un accord international, tant au sujet des significations exactes des termes techniques que de la classification des machines

(1) L'étude de M. de Baillehache sur les *Unités Electriques*, publiée en 1909, donne un exposé très complet de l'ensemble de la question des unités.

Digitized by Google

et des méthodes générales d'essais et de spécification de machines électriques, est devenu d'une importance vitale. La base scientifique de l'industrie électrique, comme l'a dit un jour M. Arthur Balfour, est commune à l'ensemble du monde civilisé ; la terminologie employée a souvent encore des sens très différents dans les différentes langues. Un simple exemple suffira à le montrer.

Le mot *dynamo*, orthographié exactement de la même manière, est d'un usage courant en anglais, en français, en allemand et dans plusieurs autres langues, mais il ne signifie pas la même chose dans toutes les langues. En Angleterre, bien que l'usage soit un peu variable, ce mot désigne le plus souvent une génératrice à courant continu, et ne s'applique pas à un alternateur ou à un moteur. En France, ce mot s'emploie comme abréviation du terme général *machine dynamo électrique*, et comprend tout générateur électrique rotatif, alternateur, moteur ou commutatrice. En Allemagne, où le mot s'est répandu tout d'abord, il signifie un générateur quelconque, qu'il s'agisse de courant continu ou de courants alternatifs, mais à l'exclusion des moteurs ou des commutatrices.

En France un *convertisseur* est ce que nous appelons un *motor-generator* (groupe de machines), tandis que ce que nous appelons *converter* y est appelé *commutatrice* ; et l'expression française *moteur-générateur* a été généralement employée pour désigner ce que nous autres, habitants de la Grande-Bretagne, appelons un « continuous-current transformer » (transformateur de courant continu).

Il ne devait pas être impossible d'arriver à une entente mutuelle sur des questions de définition de cette sorte. Personnellement, je serais tout disposé à changer l'emploi que je fais habituellement du mot *dynamo* pour adopter l'une ou l'autre des acceptions française ou allemande,

Digitized by Google

pourvu que nos amis français adoptent l'usage allemand ou que nos amis allemands adoptent l'usage français. En ce qui concerne les séries d'expression dont on se sert pour ces machines qui transforment de différentes façons des courants ou des voltages, je préfère logiquement employer le groupement de mots *motor-generator* pour représenter le groupement de machines, le trait d'union entre les mots constitutifs de l'expression correspondant au couplage entre les machines constitutives elles-mêmes ; et je ne suis pas sans espérer que nos amis de l'autre côté de la Manche qui, dans toutes les questions de langage, sont habituellement plus logiques que nous, ne reconnaissent le bien-fondé de cette préférence. Une unification dans la nomenclature est ce qu'il y a de plus essentiel, parce que les malentendus fâcheux qui se produisent dans les discussions de spécification et de contrats sont plus souvent dus à l'élasticité des termes et à un manque de précision dans les définitions. Nulle part plus que dans la spécification des machines, la question n'a d'importance plus grande.

Il serait certainement d'un grand avantage pour un ingénieur s'il pouvait rédiger dans la pratique ses spécifications dans des termes qui seraient identiques avec ceux en usage, non seulement dans son propre pays, mais aussi dans d'autres pays où des appareils semblables sont employés. Quelle quantité de malentendus seraient évités si cela pouvait être rendu possible !

A l'heure actuelle, un moteur spécifié correctement comme moteur de 10 kilowatts dans un pays n'est pas nécessairement un moteur de 10 kilowatts dans un autre pays, parce que les usages et les règles, en ce qui concerne la spécification et les exigences des essais physiques pour déterminer la puissance normale du moteur, sont différents dans divers pays. Il est certain qu'on devrait

Digitized by Google

exiger les mêmes erreurs et spécifier les mêmes élévations de températures dans la détermination de l'allure normale de la machine, quel que soit le pays où celle-ci soit construite ; autrement, l'acheteur qui reçoit des offres de commerçants rivaux pour des machines nominativement de la même puissance n'a aucune garantie que cette concurrence soit loyale.

* * *

En troisième lieu, il y a, à l'heure actuelle, une grande divergence pratique dans l'emploi des symboles dont on se sert pour représenter les différentes quantités électriques, ce qui cause une perte de temps très gênante et un gaspillage d'énergie. Non seulement l'usage des symboles varie d'un pays à l'autre, mais encore dans le même pays — et ceci est malheureusement plus fréquent en Grande-Bretagne que partout ailleurs — il varie même d'un auteur à un autre. Il est rare que deux cours emploient les mêmes symboles, et même dans les pages du Journal de notre Institution, il n'y a pas concordance entre les symboles employés par l'auteur d'un mémoire et celui d'un autre mémoire. Le Comité de rédaction tente, il est vrai, de temps en temps d'appeler l'attention des auteurs sur leur nomenclature irrégulière et leurs symboles non conformes aux conventions, mais il n'a pas qualité pour exiger de l'uniformité, et l'on ne sait d'ailleurs pas si un tel pouvoir de centralisation ne présenterait que des avantages.

* * *

Actuellement, on le sait bien, ces divers problèmes ont été l'objet de beaucoup d'études et d'une grande attention. Les Américains cependant ont été les premiers à

Digitized by Google

considérer sérieusement la question de la classification du matériel électrique, et l'American Institute of Electrical Engineers a approuvé un rapport présenté sur ce sujet par une Commission présidée par le Dr Francis B. Crocker en 1899. Peu à peu plusieurs autres pays ont suivi ce mouvement et établi des rapports qui n'ont pas été sans avoir une réelle influence sur l'adoption par l'industrie de rapports de ce genre. Plus tard, l'organisation allemande des ingénieurs et des techniciens des pays de langue allemande — connue sous l'abréviation A. E. F. (1) — s'est attaquée il y a quelque douze ans à la question des symboles en général. Ce n'est pas un minime avantage pour la Commission Electrotechnique Internationale que d'avoir obtenu la coopération de cette puissante organisation, qui est représentée parmi nous par le Geheimrat Oberpostrat professor Dr K. Strecker.

En 1901, sous les auspices de l'Institution of Civil Engineers, fut constitué le British Engineering Standards Commitee, avec Sir William Preece, K.C.B., et le colonel R. E. Crompton C. B., comme représentants de la British Institution of Electrical Engineers. Le travail excellent de ce Comité est bien connu ; il n'est pas nécessaire d'y revenir en détail.

* * *

Mais le moment était arrivé de tenter un effort beaucoup plus précis, qui ne dépendrait pas de tentatives embryonnaires des Congrès, mais qui serait en pleine possession d'une existence parfaitement organisée. Et cette organisation plus complète a pris naissance dans les conditions suivantes :

Au Congrès international de Saint-Louis, en sep-

(1) *Ausschuss für Eiseheiten und Formelgrossen.*

Digitized by Google

tembre 1904, les délégués du Gouvernement britannique à la Chambre des Délégués, le noyau officiel du Congrès, étaient le colonel Crompton, le professeur Perry et le Dr Glazebrook. M. R. Kaye Gray et M. W. Duddell, quoique non délégués de Gouvernement, assistaient aux séances de la Chambre, représentant cette Institution, comme d'autres qui y assistaient aussi.

Le rapport de M. Duddel sur les travaux du Congrès de Saint-Louis figure dans notre journal (1). A Saint-Louis, un mémoire fut présenté par le colonel Crompton sur la spécification des machines dynamo-électriques et des appareils, sujet sur lequel personne ne pouvait parler avec plus de compétence que lui. Cette communication fut suivie d'une discussion des plus animées. Beaucoup de délégués sentirent alors que le moment était venu où l'on devait considérer ces différents problèmes comme des questions internationales, et comprirent que si une collaboration internationale organisée et permanente pouvait être réalisée, le succès serait certain. On tomba d'accord pour reconnaître que les différents congrès, tenus de temps à autre, avaient été de bien trop courte durée pour permettre une étude approfondie des divers problèmes qui leur avaient été soumis, et en conséquence, la Chambre des Délégués émit à l'unanimité la proposition de la création d'une Commission internationale, douée d'une organisation susceptible d'assurer la continuité de l'effort si absolument nécessaire pour l'étude et la solution de tous les phénomènes de ce genre.

Ce vœu était le suivant :

« Que des démarches soient entreprises en vue d'assurer » la coopération des Sociétés techniques du monde par » la constitution d'une Commission représentative chargée

(1) *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 34, p. 171, 1905.

Digitized by Google

» d'examiner la question de l'étalonnage, de la nomen-
» clature et de la classification des appareils et machines
» électriques. »

En conséquence, le colonel Crompton, après son retour de Saint-Louis, se mit en rapport avec l'Institution of Civil Engineers et, après différentes tentatives, il fut décidé qu'on confierait le soin de l'organisation préalable à l'Institution of Electrical Engineers, qui convoqua les délégués de quatorze pays en juin 1906, sous la présidence de M. Alexander Siemens. Lord Kelvin en fut élu premier président et le colonel Crompton, secrétaire honoraire. Un compte rendu de ce travail préliminaire d'organisation se trouve dans le discours présidentiel du Dr Glazebrook (1).

* * *

L'idée fondamentale qui a présidé à l'organisation de la Commission Electrotechnique Internationale est celle de la constitution dans chaque pays d'un Comité Electrotechnique local, nommé soit par la Société Electro-technique reconnue dans le pays, soit par le Gouvernement. Chaque pays qui possède un Comité Electrotechnique a les mêmes droits que tout autre ; chacun d'eux verse la même contribution annuelle pour subvenir aux frais de l'organisme central ; chacun d'eux dispose du même nombre de voix quand la Commission siège en réunion plénière. Les statuts, rédigés dans la réunion préliminaire de Londres en 1906, et ratifiés dans la première assemblée de la Commission elle-même, tenue à Londres en 1908, stipulent les modes d'élection et de roulement des représentants, les conditions de location de l'Office Central de

(1) *Journal of the Institution of Electrical Engineers*, vol. 38, p. 4, 1907.

Digitized by Google

Londres et le mode d'élection du président et des vice-présidents.

Le vœu exprimé à Saint-Louis (Etats-Unis), en 1904, avait nécessairement été formulé d'une manière très générale, de façon à permettre à la Commission, si jamais elle était formée, de se développer librement. D'ailleurs il était extrêmement difficile à ce moment de prévoir exactement quelle serait la marche à suivre dans la voie où l'on allait s'engager.

En 1906, le principe de l'égalité de vote et de taxation fut énergiquement soutenu par les Américains et les Anglais à la réunion préliminaire, bien que quelques délégués eussent formulé le vœu d'une taxation *au prorata*. Le roulement du bureau a été prévu par voie d'élection annuelle ; cependant, si par hasard les élections régulières ne pouvaient avoir lieu pour une raison quelconque, le bureau précédemment élu continuerait ses fonctions jusqu'à la nomination du nouveau bureau. Une entière liberté est accordée à chaque Comité Electrotechnique en ce qui touche la direction de ses affaires particulières, sous la seule réserve que son règlement ne soit pas incompatible avec celui de la Commission. En règle générale, les décisions de la Commission Internationale doivent être prises pratiquement à l'unanimité. C'est une bonne chose que de ne pas essayer, dans l'atmosphère surchauffée d'une assemblée internationale, de contraindre une minorité : car, en octroyant ainsi un certain temps pour un examen de la question dans le calme, on peut amener de la sorte une minorité à se mettre d'accord avec les désirs de la majorité, ce qu'elle ne ferait pas sans cela ; et ainsi, à une assemblée suivante, il est possible que la même proposition passe sans rencontrer aucune opposition. Cependant, en vue d'éviter la possibilité d'une abstention de parti-pris, les décisions de la Commission

Digitized by Google

Electrotechnique Internationale, pour être adoptées d'une manière officielle, devront réunir une majorité des quatre cinquièmes au moins des pays votants, chaque pays n'ayant qu'une seule voix, quel que soit le nombre de délégués qu'il puisse nommer. Les langues officielles sont l'anglais et le français ; c'est dans ces deux langues que tous les débats ont lieu et que toutes les résolutions sont officiellement exprimées.

Pour éviter que cette organisation ne vienne à tomber entre les mains d'un clan, les statuts prévoient des moyens pour la convocation d'une assemblée par le président, ou, en cas de défaut de sa part, par deux vice-présidents (par exemple les présidents de deux Comités nationaux), si les deux vice-présidents ne peuvent ou ne veulent pas agir, trois Comités nationaux quelconques peuvent requérir le bureau central de provoquer une réunion, et la date doit en être fixée par le Bureau Central dans les trois mois de la réception de cette requête.

Le Conseil qui dirige les affaires de la Commission Électrotechnique Internationale se compose du Président, des Présidents des Comités nationaux, d'un délégué de chacun des Comités nationaux et du secrétaire honoraire.

La rédaction de ces statuts, soumis au projet par l'Institution of Electrical Engineers, absorba tout le temps des délégués à l'assemblée préliminaire, à laquelle nos vieux amis, M. C. O. Mailloux et le Dr F. B. Crocker, prirent une part prépondérante. Ils furent adoptés à la dernière réunion, sous la réserve de leur ratification ultérieure par les Comités nationaux, ce qui eut lieu en 1908.

Les travaux proprement dits de la Commission Électrotechnique Internationale commencèrent lors de la réunion du Conseil de la Commission dans cette enceinte même, en 1908. Le British Electrotechnical Committee avait cette année-là pour président Sir John Gavey, et

Digitized by Google

pour vice-présidents Sir William Preece et M. Alex Siemens ; les délégués qu'il envoya au Conseil furent Sir John Gavey et le Dr Glazebrook. (1) Les délégués étrangers représentaient quinze nations; le Rt. Hon. Mr Arthur J. Balfour leur souhaita la bienvenue.

Lord Kelvin était mort en décembre 1907, et M. Mascart qui, s'il avait vécu, eût été appelé à recueillir sa succession au fauteuil présidentiel, avait succombé en août 1908. Comme nouveau président, le Conseil choisit le professeur Elihu Thomson, et, en septembre 1911, la présidence passa à son titulaire actuel, le professeur Dr Emil Budde. En choisissant ses présidents dans les divers pays, la Commission a trouvé un grand avantage, car elle accentuait ainsi le sens d'une coopération des nations dans une œuvre d'une importance internationale. La majeure partie du temps de cette réunion du Conseil fut prise par l'étude de la constitution de cette organisation et de son mode de procéder ; mais, il y eut également un certain nombre de discussions techniques sur les unités de puissance lumineuse, sur la nomenclature, ainsi que sur les symboles. C'est alors que fut faite la première proposition en faveur d'un compromis à respecter, concernant les symboles employés pour représenter la loi d'Ohm. Dans cette réunion du Conseil, comme dans plusieurs autres assemblées de la Commission Electrotechnique internationale, les rares capacités de polyglotte de M. Mailloux, qui se fit interprète bénévole, rendirent les plus grands services.

* * *

L'événement suivant fut une conférence sans caractère

(1) C'est le professeur Silvanus P. Thomson qui rempiaça le Dr Glazebrook dans la plupart des débats, en raison des travaux de la conférence des Unités Electriques auxquels ce dernier devait prendre part.

Digitized by Google

officiel, tenue à Bruxelles en août 1910, dans laquelle les délégués furent reçus par le président du Comité belge, le professeur Eric Gerard, l'un des secrétaires du Congrès de Paris de 1881. C'est à cette conférence que la question des symboles fut soulevée par le Dr Kennelly et débattue par M. Boucherot et d'autres. M. Boucherot laissa entendre que les Français pourraient accepter le symbole C pour le courant, au lieu de I, si les Allemands voulaient consentir à abandonner W en faveur de R pour la résistance. Les délégués français, marchant dans la voie tracée par feu M. Hospitalier, présentèrent certaines règles fondamentales pour l'emploi des lettres comme symboles ; ces règles furent, après une chaude discussion, renvoyées à l'examen des divers Comités nationaux. Tout le monde reconnut qu'il serait impossible de proposer aucune longue liste de symboles qui bouleverserait de fond en comble l'usage consacré par de longues années, et que le seul espoir d'une entente internationale sur ce point reposerait sur la proposition d'adopter un petit nombre de règles générales et une liste restreinte de symboles pour les principales quantités électriques. En ce qui concerne la nomenclature, le Dr Budde fit deux propositions excellentes : la première consistait à limiter d'une manière générale le champ de la discussion sur les termes électriques au choix d'une courte liste de termes relatifs au matériel électrique seul, liste qu'il soumit ; la seconde demandait que chacun des Comités anglais, français, et allemand nommât un délégué pour dresser et composer les listes des équivalents de ces termes en anglais, français et allemand. C'est également à cette Conférence que se produisit la première tentative de discussion sur la question d'une classification internationale des machines. C'est encore à cette Conférence internationale que le Dr Kennelly souleva la question suivante, qui

Digitized by Google

fut adoptée sous forme de vœu : « Que s'il devenait un jour désirable d'adopter un nouveau nom pour une unité électrique, le nom de lord Kelvin devait être mis en avant ». A ce propos, on peut remarquer que, depuis 1892, le Board of Trade a proposé officiellement le nom de « Kelvin » pour le kilowatt-heure. L'objection personnelle que la modestie de lord Kelvin lui dicta à cette époque n'a plus aujourd'hui la même raison d'être. Nous serons tous d'accord sur ce point qu'un tel nom, s'il est adopté pour quelque unité que ce soit, doit l'être par un consentement international, et non par un simple assentiment national. Incidemment, on peut mentionner à ce propos que nos collègues allemands désireraient voir adopter le nom de « Siemens » pour l'unité de conductance.

* * *

Le petit Comité, nommé pour la discussion internationale de la nomenclature, tint sa réunion régulière à Cologne en mai 1911. Le Dr Budde vint de Berlin, M. Brunswick de Paris, et l'auteur de ce rapport eut l'honneur et la responsabilité de représenter le Comité britannique, tandis que M. Eric Gerard, qui avait présidé à Bruxelles, fut invité à prendre la présidence. Les premiers fruits d'une collaboration mutuelle furent récoltés ici dans l'acceptation par toutes les parties des symboles E, R, I, pour les trois principales quantités de la loi d'ohm, les Allemands abandonnent l'emploi de ω pour la résistance et les Anglais celui de C pour le courant. Cette proposition fut ratifiée à Turin quelques mois plus tard par la Commission réunie en assemblée plénière. Il est entendu que la National Electric Light Association of America qui, jusqu'à présent, emploie encore C au lieu

Digitized by Google

de I, n'a pas accepté ce changement. Pour le reste, les travaux du sous-comité se sont poursuivis alors et ont continué à Paris, dans une constante harmonie, malgré que des divergences de nomenclature inhérentes à la structure même des trois langues ne fussent pas bien aisées à concilier.

***

Il serait à remarquer ici, en passant, qu'un travail très considérable a été accompli de plusieurs côtés, dans la préparation des vocabulaires. La British Nomenclature Committee, sous la direction de Mr A. P. Trotter, a dressé une longue liste de termes anglais lentement choisis. Le Comité français a présenté à Turin un vocabulaire très complet et soigneusement étudié, résultat des travaux de M. Brunswick, de M. Guillaume, de M. Boucherot et d'autres, vocabulaire qui n'a jusqu'ici été que partiellement composé avec les listes des termes correspondants des autres langues. Le Comité danois, par l'intermédiaire de son représentant le professeur Absalon Larsen, a fait un excellent travail de nomenclature malgré les difficultés provenant du peu d'usage au Danemark des mots français et anglais. En revisant notre propre vocabulaire anglais, nous avons volontiers profité, dans plusieurs occasions, des meilleurs modes d'expressions proposés par le Comité danois. Nous avons déjà cité la liste allemande de termes préliminaires, comme ayant été présentée par le Dr Budde. L'Austrian Elektrotechnische Verein a suggéré aussi une courte liste de termes et de définitions. Enfin, l'Italie, le Japon, le Mexique et la Suisse ont également fourni des vocabulaires qui ont été d'une grande utilité pour l'œuvre.

Digitized by Google

* * *

Grâce à la courtoisie du Comité allemand, la première réunion plénière, qu'on avait prévu à l'origine devoir se tenir à Berlin, eut lieu à Turin, en Italie, en septembre 1911, à l'époque même où le Congrès international des applications de l'électricité et l'Exposition universelle célébraient le premier cinquantenaire de l'autonomie italienne. Cette réunion fut organisée par la Societa Elettrotecnica Italiana, avec l'aide du Comité électrotechnique italien, et l'appui des divers comités locaux de la Commission Electrotechnique Internationale. Le Comité d'honneur fut placé sous le haut patronage de S. A. R. le duc des Abruzzes et comprenait vingt-huit membres, parmi lesquels le professeur Elihu Thomson et le colonel Crompton. Les membres étaient au nombre d'environ cinq cents et comprenaient un grand nombre de représentants officiels de gouvernements et de délégués de diverses sociétés techniques.

Cinquante-six délégués, appartenant à dix-neuf nations, suivirent les réunions de la Commission électrotechnique internationale, et pour la première fois dans l'histoire de ce mouvement, les gouvernements de la Grande-Bretagne, des Indes-Britanniques et les Etats-Unis d'Amérique se trouvèrent officiellement représentés. Les propositions mises en avant à la Conférence de Bruxelles et qui avaient été examinées avec soin par les divers comités nationaux furent soumises à l'assemblée. Les décisions officielles ont été publiées en octobre 1911, dans le « Résumé » de la réunion de Turin et aussi dans le rapport complet. Elles comprennent une décision relative à la question antérieurement débattue de la direction à considérer comme positive dans la rotation des vecteurs.

Bien que les travaux techniques aient occupé la plus

Digitized by Google

grande partie des journées, le Comité italien n'épargna pas cependant sa peine et réussit admirablement à rendre cette réunion aussi agréable au point de vue social qu'utile au point de vue technique. La cordialité de la réception qui fut à un haut degré la caractéristique de cette réunion se reflétera certainement dans les travaux des divers comités spéciaux nommés à cette occasion.

D'un intérêt tout spécial fut la motion, votée à l'unanimité dans une assemblée plénière du Congrès, qui demandait à la Commission Electrotechnique Internationale de se charger de l'organisation des futurs congrès électrotechniques, en ce qui concerne leur date, leur lieu de réunion et leur objet.

Les Comités de la C. E. I. ont tous formulé leur adhésion à la résolution adoptée par le Conseil, conformément à cette requête formelle du Congrès, et la Commission Electrotechnique Internationale a donné son adhésion à la fixation à San Francisco en 1915 du prochain Congrès Electrotechnique International.

* * *

Le premier rapport annuel de la Commission a été publié en mars 1910, et le second en 1911 ; plusieurs rapports de détail ont paru de temps en temps en français et en anglais, les deux langues officielles de la Commission. Le troisième rapport annuel, paru en juin 1912, récapitule brièvement les divers événements qui ont conduit à la situation actuelle et enregistre un certain nombre de progrès pratiques.

Depuis la publication de ce rapport, trois des petits comités nommés à Turin se sont réunis à Paris. Le Comité des symboles, qui a fait paraître un rapport spécial, a été présidé par le professeur Paul Janet, directeur

Digitized by Google

de l'Ecole Supérieure d'Electricité ; M. A. Legros y représentait le Comité Britannique ; sa rare compétence en matière typographique fut particulièrement utile. Le Comité de nomenclature, formé du Dr Budde, de M. Brunswick, du professeur Larsen, du professeur M. Ascoli et de l'auteur de ce rapport, a continué la discussion du vocabulaire. Le Comité de spécification, sous la présidence de M. Boucherot, et dont a fait partie comme délégué M. W. Miller, a consacré trois journées entières, de neuf heures du matin à sept heures du soir, à un ardent débat où a été posée la base de règles internationales probables pour la spécification des machines et des appareils électriques. La coopération de notre Engineering Standards Committee a été, en ce qui concerne la Grande-Bretagne, de la plus grande utilité en cette matière. De plus, la coopération de la Bristish Electric and Allied Manufacturers Association nouvellement fondée a ouvert une large voie pour gagner l'adhésion en général des industriels anglais.

* * *

Grâce à l'amabilité du Comité allemand, la nouvelle réunion officielle se tiendra à Berlin en 1913 ; les délégués s'y rendront certainement en grand nombre pour faire honneur à leur nouveau président, à qui est dû pour une si grande part le premier résultat pratique de la Commission. D'ailleurs, l'hospitalité et la courtoisie des Allemands sont si connues des électriciens de tous les pays qu'on peut s'attendre à ce qu'il règne assurément une grande cordialité dans les réunions.

Jusqu'ici, les documents officiels de la Commission, publiés par le Bureau central de Londres, ont été imprimés seulement dans les deux langues officielles, le

Digitized by Google

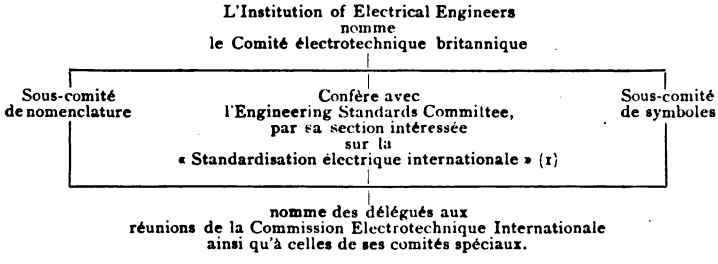
français et l'anglais ; mais le moment semble venu de publier aussi maintenant ces documents dans d'autres langues, de manière à atteindre le cercle plus étendu de tous les électriciens qui ne sont pas des polyglottes comme doivent nécessairement l'être les délégués. Personnellement, j'espère voir aboutir les efforts qui ont pour but de faire accepter l'allemand et l'espagnol comme traduction des langues officielles, étant entendu que l'on conserverait la convention d'employer l'anglais et le français pour les discussions verbales.

* * *

L'organisation internationale de la Commission, ainsi que son « modus operandi », sont très bien représentées par les deux diagrammes I et II que je dois à l'obligeance du Secrétaire général de la Commission, M. Le Maistre ; c'est avec gratitude que je saisis ici l'occasion de reconnaître son concours dans la préparation de ce rapport.

* * *

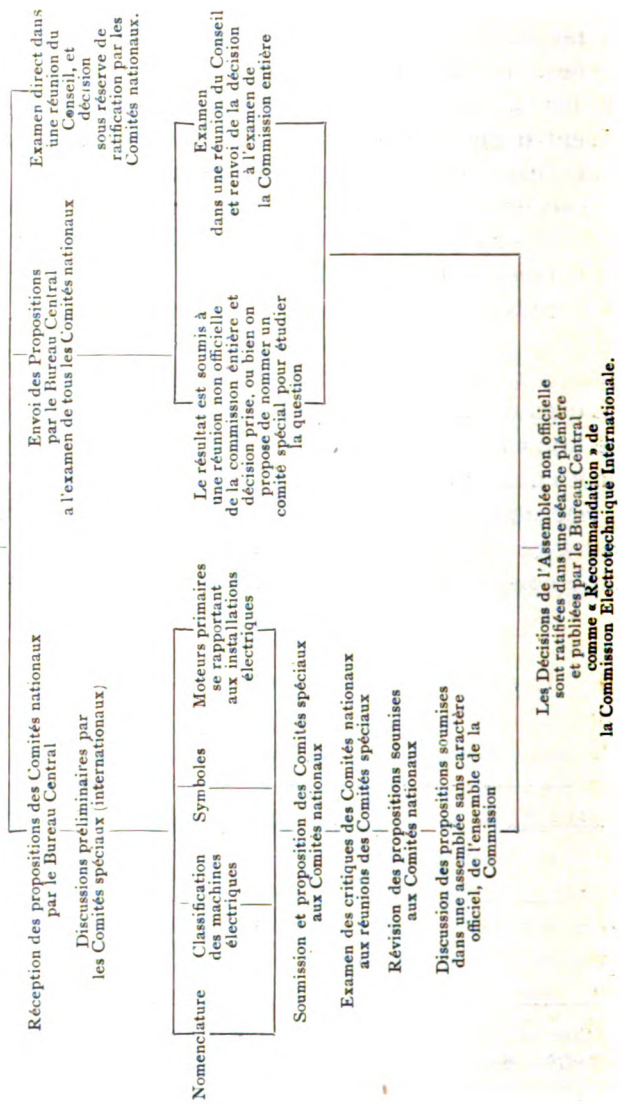
DIAGRAMME I.



(1) Cette section est composée en majeure partie de Représentants :
Des départements ministériels ;
Du Comité électrotechnique britannique ;
De l' « Incorporated Municipal Electrical Association (I. M. E. A.) » ;
De la « British Electrical and allied manufacturers Association (B. E. A. M. A.). »

Digitized by Google

DIAGRAMME II.



Digitized by Google

Les Comités Électrotechniques trouvent auprès des divers gouvernements un large appui financier et les diverses délégations des gouvernements sont d'une grande utilité à l'œuvre poursuivie ; l'appui de l'Etat donne, en outre, du poids aux divers comités dans leurs pays respectifs.

Le Gouvernement des Indes Britanniques fournit une aide pécuniaire à la Commission, bien que sans avoir formé de Comité.

La Commission Électrotechnique Internationale est maintenant l'émanation de vingt-deux pays. En dehors de ceux-ci : la République Argentine, l'Australie, la Chine, l'Equateur, la Nouvelle Zélande, le Panama, le Pérou, le Portugal, la Roumanie, le Siam et l'Afrique du Sud ont manifesté l'intérêt considérable qu'ils prennent à ces travaux et il est certain que, tout au moins dans quelques-uns de ces pays, avant qu'il ne soit longtemps, un Comité électrotechnique y sera constitué.

* * *

Il serait inadmissible que le généreux appui de la Commission Electrotechnique Internationale dans les différents pays et la cordialité qui anime les délégués dans la conduite de leur délibération n'aboutissent à des résultats utiles et pratiques : le projet d'une entente meilleure entre les électriciens des diverses nations par un accord général comme la terminologie, les symboles et la classification des machines électriques, favorisera sûrement le libre développement du commerce international, dont profiteront tout à la fois et l'acheteur et le fabricant. Enfin, et ce n'est pas là le moindre résultat d'assemblées durant lesquelles les susceptibilités nationales sont mises de côté et qui sont le point de départ d'amitiés solides entre nombre d'électriciens de nationalités différentes,

Digitized by Google

ces réunions internationales périodiques doivent, sans aucun doute, constituer un facteur d'une importance qui n'est pas négligeable pour la cause de la paix du monde.

SILVANUS P. THOMPSON.

Digitized by Google

MÉMOIRES.

621.312 **Le calcul des dimensions des armatures à courant continu.**

INTRODUCTION.

Les considérations qui président généralement à la fixation des dimensions des armatures à courant continu ne permettent guère de tenir compte rationnellement des multiples conditions de bon fonctionnement actuellement imposées au matériel électrique. En effet, elles découlent simplement de l'observation des *limites* entre lesquelles varient, dans des machines existantes qui ont donné satisfaction, un certain nombre de grandeurs importantes telles que la densité de courant dans les conducteurs induits, la valeur de l'intensité du champ dans l'entrefer, le nombre d'ampères conducteurs par centimètre de périphérie, la vitesse périphérique, le nombre d'ampères conducteurs par pôle. Il en résulte que l'élaboration d'un avant-projet de dynamo par les méthodes usuelles manque absolument de netteté et exige une succession de tâtonnements et de vérifications.

Et pourtant, une fois en possession des constantes d'une machine, il est facile de fixer numériquement ses qualités, c'est-à-dire de calculer certains cœfficients qui permettront de se faire une idée assez claire de son fonctionnement ou, tout au moins, d'affirmer qu'à tel point de vue déterminé il sera supérieur ou inférieur à celui d'une

Digitized by Google

autre machine, semblable comme type, de spécification connue. Nous voulons parler ici du triple contrôle de l'échauffement, de la commutation et de la chute de tension.

La présente étude a précisément pour but de montrer comment il est possible, en s'imposant *a priori* ces cœfficients caractéristiques de fonctionnement, d'en déduire rationnellement les dimensions de l'armature en projet, sans devoir toutefois se livrer à des calculs compliqués.

Il va sans dire que, pour atteindre ce résultat, nous devrons introduire un certain nombre de données arbitraires; mais ces dernières auront une signification concrète bien tangible et d'un caractère nettement constructif. En outre, l'influence de leur choix, aisément mise en évidence, ne sera jamais perdue de vue, au cours du développement des calculs, par suite de la simplicité même des formules qui les lieront aux dimensions.

Nous commencerons par mettre en lumière quelques relations générales, très simples, existant entre les dimensions principales d'une armature à courant continu et les cœfficients qui caractérisent son fonctionnement. Ensuite, nous étudierons leur application aux cas usuels de la pratique.

I. — FORMULES GÉNÉRALES RELATIVES AUX DIMENSIONS PRINCIPALES.

1. — *Surface refroidissante. Forme des pièces polaires. Poids total.*

Nous entendons par *dimensions principales* d'une armature à courant continu le diamètre extérieur D des tôles et l'épaisseur totale de fer L du paquet formé par celles-ci.

Dans tout ce qui suit, nous supposons avoir affaire à des armatures bobinées en tambour, la disposition des raccords étant celle de l'enroulement en manteau.

Digitized by Google

Nous admettons, dans ces conditions, que la longueur axiale de l'armature, entre flasques, peut être égalée approximativement à 1,25 L, et que la longueur totale de l'induit bobiné s'obtient en ajoutant [1] à cette dernière valeur les 7/10 du pas polaire (compté à la périphérie). Nous considérons, avec H.-M. Hobart, comme *surface refroidissante* S de l'induit l'aire cylindrique correspondante :

$$S = \pi D \left(1{,}25\, L + 0{,}7 \frac{\pi D}{2p}\right) = 3{,}93\, D L + 3{,}46 \frac{D^2}{p} \quad (1)$$

$2p$ désignant le nombre de pôles.

Appelons μ le rapport de l'arc polaire au pas polaire et remarquons que la *forme* des pièces polaires est définie par l'expression

$$m = \frac{1{,}25\, L}{\frac{\mu \pi D}{2p}} = 0{,}796 \frac{p L}{\mu D} \quad (2)$$

Ainsi le cas des pièces polaires carrées, assez souvent préconisées, correspond à $m = 1$.

Si dans l'égalité (1) nous remplaçons L par sa valeur tirée de (2) il vient

$$S = \frac{3{,}93\, m \mu D^2}{0{,}796\, p} + 3{,}46 \frac{D^2}{p} = (4{,}94\, m \mu + 3{,}46) \frac{D^2}{p} \quad (3)$$

On peut encore admettre, *à titre de première approximation*, que pour réaliser un échauffement imposé de l'armature il faut adopter une valeur de S directement proportionnelle aux pertes totales w de l'induit et inversement proportionnelle à la vitesse périphérique $\pi D N$ (N représentant le nombre de tours par seconde de la machine). En prenant comme unité de longueur le centi-

[1] H.-M. Hobart et F. Achard : *Génératrices électriques à courant continu* ; Paris, 1908 ; page 29.

Digitized by Google

mètre et exprimant w en watts, on est ainsi amené, pour des machines ouvertes de construction courante, à la formule empirique :

$$S = 4000 \frac{w}{\pi D N} \tag{4}$$

Remplaçant dans (3) on obtient finalement :

$$D^3 = \frac{258\, p\, w}{(m\mu + 0{,}7)\, N} \tag{5}$$

H.-M. Hobart a observé une relation remarquable (*Génératrices électriques à courant continu*, page 114) entre le terme $D^2 L$ et le *poids total de la machine* qui en dépend directement. Il résulte de cette constatation que pour réaliser des machines légères on doit s'efforcer de réduire le produit $D^2 L$ ou, ce qui revient au même, l'expression suivante, qui lui est proportionnelle d'après (2) et (5) :

$$P = \frac{w}{\left(1 + \frac{0{,}7}{m\mu}\right) N} \tag{6}$$

2. — *Tension de réactance. Chute ohmique.*

Afin de simplifier les développements algébriques, nous introduisons une *profondeur fictive d'encoche* h telle que le produit $\pi D h$ représente la surface annulaire de la couronne active des tôles. Cette quantité h, légèrement inférieure à la profondeur réelle de l'encoche, s'en rapproche d'autant plus que le diamètre D est plus grand.

Représentons par α le rapport de la surface annulaire de la couronne active à la surface occupée par la totalité des encoches de la denture ; par k le rapport de la section d'une encoche à la section totale de cuivre qu'elle renferme.

Digitized by Google

Considérons l'expression : $\theta = h/\alpha$. Remarquons que la section de l'ensemble des conducteurs répartis sur l'armature est égale à

$$\frac{\pi D h}{k \alpha} = \frac{\pi D \theta}{k}.$$

Si donc on désigne par d la densité de courant et par A le nombre d'ampères conducteurs par centimètre de périphérie, on a

$$\frac{\pi D \theta d}{k} = \pi D A$$

d'où $\theta = A k/d$. On voit que les conceptions des grandeurs A et θ sont analogues.

Nous évaluons la longueur d'un conducteur actif, y compris ses raccords, en ajoutant à la longueur entre flasques de l'armature une longueur de connexions estimée égale à 1,35 fois le pas polaire. Désignant par n le nombre de conducteurs actifs, par s la section de chacun d'eux et comptant sur une résistivité du cuivre, à chaud, de 2 microhms-centimètres, on obtient pour la résistance combinée r d'un induit présentant $2c$ dérivations :

$$r = \frac{2.10^{-6}\, n \left(1{,}25\, L + 1{,}35 \frac{\pi D}{2p}\right)}{4 c^2 s}$$

d'où

$$s = \frac{n \left(0{,}625\, L + \frac{1{,}06}{p} D\right) 10^{-6}}{c^2 r}. \qquad (7)$$

On peut alors écrire

$$\pi D h = n s k \alpha = \frac{n^2 k \alpha \left(0{,}625\, L + \frac{1{,}06}{p} D\right) 10^{-6}}{c^2 r}$$

Digitized by Google

et en tirer

$$n^2 = \frac{\pi D \theta c^2 r 10^6}{k\left(0{,}625 L + \frac{1{,}06}{p} D\right)}. \tag{8}$$

Représentons respectivement par e, I, $\mathfrak{N}$ la force électromotrice (ou contre-électromotrice s'il s'agit d'un moteur), le courant total d'armature et le flux utile, par pôle, en pleine charge. Désignons par λD le diamètre du collecteur et par β le *pas* des lames compté à sa périphérie, le nombre de ces dernières étant donc égal à $\pi\lambda D/\beta$. Comme expression approchée de la *tension de réactance* ε nous utilisons la formule suivante : (1)

$$\varepsilon = \frac{8 a e I \left(L + 0{,}1 . 1{,}5 \frac{\pi D}{2p}\right)}{p \mathfrak{N}}.$$

Nous supposons que le collecteur est pourvu d'autant de lignes de balais qu'il y a de pôles et nous n'examinerons pas le cas des enroulements multiples. Dès lors on a

$$a = \frac{n\beta}{2\pi\lambda D},$$

d'où, en tenant compte de la relation fondamentale $e = \frac{p}{c} n N \mathfrak{N} 10^{-8}$:

$$\varepsilon = \frac{4 \beta I N n^2 \left(L + \frac{0{,}236 D}{p}\right) 10^{-8}}{\pi c \lambda D}. \tag{9}$$

(1) Éric Gerard : *Leçons sur l'Électricité*, 8e édition ; Paris, 1910 ; tome 1er, page 702. — H.-M. Hobart et F. Achard : *Génératrices électriques à courant continu*, page 13. Pour nous conformer à l'usage introduit par ces derniers auteurs, nous avons conservé la forme qu'ils donnent au terme entre parenthèses, bien que les hypothèses faites au début conduisent à l'expression un peu différente :

$$1{,}025 L + 0{,}1 . 1{,}35 \frac{\pi D}{2p}.$$

Digitized by Google

On en déduit :

$$n^2 = \frac{\pi c \lambda D \varepsilon 10^8}{4 \beta I N \left(L + \frac{0,236 D}{p}\right)} \tag{10}$$

et

$$a^2 = \frac{n^2 \beta^2}{4 \pi^2 \lambda^2 D^2} = \frac{c \varepsilon \beta 10^8}{16 \pi \lambda D N I \left(L + \frac{0,236 D}{p}\right)}. \tag{11}$$

Rapprochant les valeurs de n^2 fournies par les formules (8) et (10) on obtient

$$\frac{\theta c r}{k\left(0,625 L + \frac{1,06 D}{p}\right)} = \frac{\lambda \varepsilon 10^2}{4 \beta I N \left(L + \frac{0,236 D}{p}\right)}$$

d'où l'on tire, tout calcul fait,

$$\frac{p L}{D} = \frac{26,5 k \lambda \varepsilon - 0,236 \beta c \theta N I r}{\beta c \theta N I r - 15,6 k \lambda \varepsilon}. \tag{12}$$

3. — *Réaction d'induit.*

La connaissance du rapport φ existant, en pleine charge, entre les ampères-tours, par pôle, de l'enroulement induit et ceux requis, sur l'inducteur, pour vaincre la reluctance d'un entrefer simple permet de juger du plus ou moins d'importance que présentera, sur le fonctionnement d'une armature donnée, la réaction d'induit.

Nous allons établir une expression de φ qui nous mettra à même, dans les applications, de tenir compte de la réaction d'induit lors de la fixation des dimensions principales de l'armature en projet.

Désignons par δ la longueur, en centimètres, de l'entrefer simple. Nous évaluons la valeur $\mathcal{H}$ de l'intensité du champ dans l'entrefer en recherchant le quotient du flux $\mathfrak{N}$ par la surface polaire $m\left(\frac{\pi \mu D}{2 p}\right)^2$:

Digitized by Google

$$\mathcal{H} = \frac{c\,p\,e\,10^8}{2{,}47\,n\,m\,\mathrm{N}\,\mu^2\,\mathrm{D}^2}.$$

Les ampères-tours absorbés par la reluctance de l'entrefer valent

$$\frac{\mathcal{H}\,\delta}{4\,\pi\,10^{-1}} = \frac{0{,}322\,\delta\,c\,p\,e\,10^8}{n\,m\,\mathrm{N}\,\mu^2\,\mathrm{D}^2}.$$

Quant aux ampères-tours, par pôle, de l'induit leur nombre s'élève à

$$\frac{n\,\mathrm{I}}{8\,c\,p}.$$

On obtient ainsi :

$$\varphi = \frac{n^2\,\mathrm{D}^2}{p}\,\frac{0{,}388\,m\,\mathrm{N}\,\mathrm{I}\,\mu^2}{\delta\,c^2\,p\,e\,10^8}.$$

Transformons cette dernière formule en y introduisant la valeur de D^2/p fournie par (3) et l'expression suivante de n^2 déduite de (8) et (2) :

$$n^2 = \frac{\pi\,c^2\,p\,\theta\,r\,10^6}{k\,(0{,}785\,m\,\mu + 1{,}06)}.$$

Il vient alors

$$\varphi = \frac{0{,}388\,\pi\,\mathrm{N}\,\mathrm{I}\,r\,\theta\,\mathrm{S}}{k\,\delta\,e\,10^2}\,\frac{m\,\mu^2}{(0{,}785\,m\,\mu + 1{,}06)(4{,}94\,m\,\mu + 3{,}46)} \quad (13)$$

et si l'on tient compte de la valeur de S tirée de (4)

$$\varphi = \frac{15{,}5\,\mathrm{I}\,r\,\theta\,w}{k\,\delta\,e\,\mathrm{D}}\,\frac{m\,\mu^2}{(0{,}785\,m\,\mu + 1{,}06)(4{,}94\,m\,\mu + 3{,}46)}. \quad (14)$$

II. APPLICATION DES FORMULES GÉNÉRALES AU CALCUL DES DIMENSIONS DES ARMATURES.

I. — OBSERVATIONS GÉNÉRALES.

Nous n'envisageons que le cas de machines fonctionnant sans pôles auxiliaires ni enroulements compensateurs.

Digitized by Google

Dans de telles dynamos la tension de réactance ε ne doit pas, en général, dépasser 2 volts et la valeur du rapport φ ne peut guère excéder 1,2 surtout quand il s'agit de génératrices devant fonctionner sans décalage des balais.

Remarquons que dans les formules où l'une des deux quantités β et λ apparaît au numérateur, l'autre se trouve au dénominateur, de telle sorte qu'il serait toujours possible d'y introduire le rapport β/λ.

Reprenons la relation (12) précédemment établie :

$$\frac{\varphi L}{D} = \frac{26{,}5\, k \lambda \varepsilon - 0{,}236\, \beta c \theta N I r}{\beta c \theta N I r - 15{,}6\, k \lambda \varepsilon}.$$

Comme ni le numérateur ni le dénominateur du second membre de cette égalité ne doivent devenir nuls, on en déduit la double condition :

$$112 > \frac{\beta c \theta N I r}{k \lambda \varepsilon} > 15{,}6. \qquad (15)$$

Ces inégalités (15) nous montrent dans quelles limites le problème de la construction de ces armatures est susceptible d'être résolu.

Ainsi, à titre d'application numérique, examinons l'exemple suivant qui peut correspondre au cas d'une machine à 500 volts :

$$I r = 10 \text{ volts} ; \quad \varepsilon = 2 \text{ volts} ; \quad \lambda = 0{,}7 ; \quad \theta = 1{,}75$$
$$\beta = 0{,}5 \text{ cm} ; \quad k = 2{,}5.$$

Supposons d'abord qu'il s'agisse d'un enroulement d'induit en série simple : $c = 1$.

On a, comme double condition, $44{,}8 > N > 6{,}24$.

Si l'on veut donc respecter les données spécifiées, le projet d'une telle machine est impossible pour toute vitesse angulaire non comprise entre 375 et 2700 tours par minute (quel que soit le nombre de pôles).

Digitized by Google

Supposons, à présent, qu'on veuille adopter un bobinage en parallèle simple et que la vitesse angulaire choisie soit celle de 600 tours par minute. Alors $c = p$, $N = 10$ et les inégalités (15) donnent :

$$4{,}48 > p > 0{,}624.$$

Les seuls nombres de pôles qui permettent de réaliser une telle dynamo sont donc 2, 4, 6 et 8.

2. — MACHINES BIPOLAIRES.

a) *Méthodes de calcul.*

Les formules (5) et (14) donnent, dans le cas des machines bipolaires :

$$\left.\begin{aligned} D &= \sqrt[3]{\frac{258\,w}{(m\mu + 0{,}7)\,N}} \\ \delta &= \frac{2{,}43\,I\,r\,\theta\sqrt[3]{N\,w^2}}{k\,e\,\varphi}\;\frac{m\,\mu^2\sqrt[3]{m\,\mu + 0{,}7}}{(0{,}785\,m\,\mu + 1{,}06)\,(4{,}94\,m\,\mu + 3{,}46)} \end{aligned}\right\} \quad (16)$$

D'autre part, les relations (2) et (12) permettent d'écrire :

$$m\,\mu = \frac{21{,}1\,k\,\lambda\,\varepsilon - 0{,}188\,\beta\,\theta\,N\,I\,r}{\beta\,\theta\,N\,I\,r - 15{,}6\,k\,\lambda\,\varepsilon}. \quad (17)$$

La valeur de μ étant fixée par comparaison, on déduira m de la formule (17). Les quantités θ, β et λ constituent les données arbitraires dont il a été question dans l'Introduction (p. 398).

On s'impose les valeurs de N, e, Ir, ε, w, φ; quant à k, on l'évalue également par comparaison.

Dès lors, les formules (16) permettent de calculer D et δ. On obtient L par application de la formule (2) :

$$L = 1{,}256\,m\,\mu\,D.$$

Comme on le voit, la méthode conduit à la détermina-

Digitized by Google

tion des dimensions principales sans qu'il soit nécessaire de procéder à des tâtonnements ou à des vérifications.

Remarquons que le calcul de δ se simplifie notablement si l'on s'aide d'une table ou d'un graphique donnant directement, en fonction de $m\mu$, les valeurs de l'expression

$$\frac{m\mu\sqrt[3]{m\mu+0{,}7}}{(0{,}785\,m\mu+1{,}06)(4{,}94\,m\mu+3{,}46)}.$$

On peut aussi procéder autrement et s'imposer le rapport L/D, ce qui revient à se fixer m; dans ce cas, bien entendu, θ ne sera plus pris arbitrairement, mais on le déduira de la formule (17).

Montrons, enfin, la façon d'opérer lorsqu'on se donne d'avance soit l'entrefer δ lui-même, soit une relation entre δ et D (cas pour lesquels ni m, ni θ ne seront être arbitrairement choisis).

Pour cela, tirons θ de (17) :

$$\theta=\frac{k\lambda\varepsilon(21{,}1+15{,}6\,m\mu)}{\beta\,\mathrm{N}\,\mathrm{I}\,r\,(0{,}188+m\mu)}.$$

Remplaçons dans l'expression de δ (16); il vient

$$\delta=\frac{2{,}43\,\lambda\varepsilon}{e\varphi\beta}\sqrt[3]{\left(\frac{w}{\mathrm{N}}\right)^2}\,\mu f(m\mu) \qquad (18)$$

en posant

$$f(m\mu)=\frac{m\mu(21{,}1+15{,}6\,m\mu)\sqrt[3]{m\mu+0{,}7}}{(m\mu+0{,}188)(0{,}785\,m\mu+1{,}06)(4{,}94\,m\mu+3{,}46)}.$$

Au moyen de l'égalité (18), on obtient aisément, en utilisant une table ou un graphique donnant les valeurs de $f(m\mu)$, la grandeur à adopter pour m, ce qui permet de calculer D, L et θ.

Dans le cas où l'on s'impose une relation entre δ et D, il est commode d'admettre une loi de la forme $\delta=\mathrm{B}\sqrt{\mathrm{D}}$. En pratique, on se trouvera généralement bien d'une

Digitized by Google

valeur de B voisine de 0,05 (l'unité de longueur étant le centimètre).

La formule (18) se transforme alors et donne

$$1{,}04\,B = \frac{\lambda\,\varepsilon}{e\,\varphi\,\beta}\sqrt{\frac{w}{N}}\,\mu\,\psi\,(m\,\mu) \qquad (19)$$

avec

$$\psi\,(m\,\mu) = \frac{m\,\mu\,(21{,}1 + 15{,}6\,m\,\mu)\sqrt{m\,\mu + 0{,}7}}{(m\,\mu + 0{,}188)\,(0{,}785\,m\,\mu + 1{,}06)\,(4{,}94\,m\,\mu + 3{,}46)}.$$

Ici encore, afin de faciliter les calculs, on emploiera avec avantage une table ou un graphique fournissant les valeurs de $\psi\,(m\,\mu)$. On en déduira m, d'où D et L ainsi que θ.

b) *Rectification des résultats des calculs.*

Lorsqu'on cherche à appliquer numériquement les formules indiquées, on se heurte bientôt à une difficulté. C'est que la valeur de a fournie par l'égalité (11)

$$a = \frac{2{,}5.10^3}{D}\sqrt{\frac{\varepsilon\,\beta}{\pi\,\lambda\,N\,I\,(1{,}256\,m\,\mu + 0{,}236)}}$$

n'est qu'*exceptionnellement* admissible. En effet, cette quantité doit être égale à un nombre entier ou, tout au moins, à la moitié [1] d'un nombre entier supérieur à l'unité.

Pour ne pas être obligé de changer les valeurs de D et L, déjà fixées, on peut opérer comme suit les modifications nécessaires.

Au moyen des valeurs *provisoires* de ε, β et λ, on calcule

[1] Il arrive, en effet, surtout dans le cas d'armatures de machines de faible puissance (portant des bobinages à fils), que les constructeurs adoptent des dispositions de ce genre, afin d'utiliser le même nombre de lames de collecteur pour différents enroulements. L'induit comporte alors, en nombre égal, des bobines à u spires et à $u + 1$ spires, de telle sorte que le nombre moyen de spires par bobine est égal à $u + 1/2$.

Digitized by Google

l'expression $\lambda\,\varepsilon/\beta = F$ qui sera conservée *définitivement*, de façon à respecter la relation (12) entre les dimensions principales fixées. Se reportant ensuite à la formule (11), on recherche quelles sont les valeurs de $\varepsilon\,\beta/\lambda$ susceptibles de donner un nombre admissible pour a, et l'on adopte celle qui, multipliée par F, fournit une valeur tolérable de ε^2. Cette dernière une fois choisie, on modifie les valeurs de λ et β (ou l'une d'elles au moins) de telle sorte que leur rapport λ/β soit égal à F/ε; pour effectuer cet ajustement, on se laisse guider par les indications que donnent tous les traités de construction à propos de l'établissement des dimensions des collecteurs.

Il est alors facile de fixer le nombre de lames, lequel, multiplié par $2a$, donne la valeur définitive de n.

c) *Dispositions usitées dans la construction, par séries, des dynamos bipolaires.*

En vue d'utiliser les mêmes tôles dans deux ou plusieurs machines d'une série, les constructeurs se contentent fréquemment, lorsqu'ils passent de l'étude d'une dynamo à celle d'une autre de puissance immédiatement supérieure dans la série à établir, d'augmenter L en conservant D. Cette manière de procéder est fort avantageuse pour le fabricant : elle permet d'employer dans la seconde machine les mêmes fonds porte-paliers que dans la première, le même diamètre (et, partant, plusieurs pièces identiques) pour le collecteur, et, en général, un grand nombre de pièces peuvent être d'un emploi commun dans la construction des deux machines.

Voyons dans quelles conditions l'usage de cette méthode se concilie avec les exigences d'un fonctionnement satisfaisant et d'une bonne utilisation des matériaux.

Afin de réaliser, de part et d'autre, le même échauffe-

Digitized by Google

ment de l'armature nous devons observer, en vertu de (5), la relation :

$$\frac{w}{(m\,\mu + 0{,}7)\,N} = \frac{w'}{(m'\,\mu' + 0{,}7)\,N'}.$$

D'ailleurs, l'égalité (2) donne :

$$m'\,\mu' = \frac{L'}{L}\,m\,\mu.$$

Remplaçant, on obtient :

$$\frac{L'}{L} = \frac{w'\,N}{w\,N'}\left(1 + \frac{0{,}7}{m\,\mu}\right) - \frac{0{,}7}{m\,\mu}.$$

Comme il s'agit de machines semblables et de puissances voisines, on peut admettre que les valeurs de w et w' sont approximativement proportionnelles aux puissances respectives des deux dynamos. Introduisant cette hypothèse dans la formule (6), on en conclut que le *poids par kilowatt* de la machine varie proportionnellement à l'expression :

$$\frac{P}{w} = \frac{1}{\left(1 + \frac{0{,}7}{m\,\mu}\right) N}.$$

Or, on a $m'\,\mu' > m\,\mu$ puisque $L'/L > 1$. D'autre part, dans une série normalement établie, on adopte $N' < N$.

Dès lors, la seconde machine fournit certainement une valeur de P'/w' supérieure à celle de P/w. Sous ce rapport, l'infériorité de la seconde machine est d'autant plus accusée que l'écart des puissances est plus grand.

Quant à l'égalité (17), il sera, en général, facile d'y satisfaire en modifiant convenablement la chute ohmique (dans le cas où l'on désire conserver les autres paramètres: k, λ, ε, β, $\mathfrak{h}$).

Très souvent aussi le constructeur catalogue la même

Digitized by Google

machine pour différentes puissances [1], ces dernières variant en raison directe de la vitesse angulaire. Ainsi, par exemple, l'armature d'une dynamo de 3 kilowatts sous 120 volts, tournant à 600 tours par minute, sera identique à celle d'une génératrice de 6 kilowatts, 240 volts, 1200 tours.

Il est alors aisé de reconnaître que la tension de réactance croît proportionnellement à la vitesse angulaire.

Tant que les pertes w n'augmenteront pas plus vite que N le fonctionnement restera satisfaisant [2] au point de vue de la surélévation de température de l'armature.

D'ailleurs, en pratique, ce sont généralement les exigences de la commutation, plutôt que celles du refroidissement, qui limitent, dans ce cas, l'accroissement de la puissance.

3. — MACHINES MULTIPOLAIRES.

Nous n'examinerons que les deux cas usuels de la pratique :

1° les armatures à bobinage en parallèle simple ;

2° les armatures bobinées en série simple.

De même que pour les machines bipolaires (page 406), nous considérons les quantités θ, β et λ comme des données arbitraires.

a) *Méthodes de calcul des armatures à bobinage en parallèle simple.*

Occupons-nous d'abord de la détermination du nombre de pôles.

---

[1] On suppose, bien entendu, qu'on modifie le bobinage des électros shunt pour les approprier aux voltages correspondants.

[2] Dans les limites d'approximation des considérations développées page 399.

Digitized by Google

Des égalités (2) et (12) nous tirons, puisque $c = p$:

$$\frac{m\mu}{0{,}796} = \frac{26{,}5\,k\lambda\varepsilon - 0{,}236\,p\,\beta\theta\,\mathrm{N}\,\mathrm{I}\,r}{p\,\beta\theta\,\mathrm{N}\,\mathrm{I}\,r - 15{,}6\,k\lambda\varepsilon}$$

d'où la formule :

$$p = \frac{26{,}5 + 19{,}6\,m\mu}{0{,}236 + 1{,}256\,m\mu}\,\frac{k\lambda\varepsilon}{\beta\theta\,\mathrm{N}\,\mathrm{I}\,r} \tag{20}$$

Si nous remplaçons, dans (5), p par sa valeur (20) il vient :

$$\mathrm{D} = \sqrt[3]{\frac{258\,(26{,}5 + 19{,}6\,m\mu)}{(m\mu + 0{,}7)\,(0{,}236 + 1{,}256\,m\mu)}\,\frac{k\lambda\varepsilon\,\omega}{\beta\theta\,\mathrm{N}^2\,\mathrm{I}\,r}} \tag{21}$$

On calcule $m\mu$ en fixant la valeur de φ et en s'imposant soit l'entrefer δ lui-même, soit une relation entre δ et D.

La formule (14) nous donne dans le premier cas :

$$\varphi\,\delta = \frac{\mathrm{I}\,r\,\theta}{k\,e}\sqrt[3]{\frac{\beta\theta\,\omega^2\,\mathrm{N}^2\,\mathrm{I}\,r}{k\lambda\varepsilon}}\,\mu\,f_1\,(m\mu) \tag{22}$$

en posant

$$f_1\,(m\mu) = \frac{15{,}5\,m\mu}{(0{,}785\,m\mu + 1{,}06)\,(4{,}94\,m\mu + 3{,}46)}\times \sqrt[3]{\frac{(m\mu + 0{,}7)\,(0{,}236 + 1{,}256\,m\mu)}{258\,(26{,}5 + 19{,}6\,m\mu)}}.$$

Dans le second cas nous utilisons (comme nous l'avons fait pour les machines bipolaires) une loi de la forme $\delta = \mathrm{B}\sqrt{\mathrm{D}}$.

On obtient alors :

$$\varphi\,\mathrm{B} = \frac{\mathrm{I}\,r\,\mathrm{N}\,\theta}{k\,e}\sqrt{\frac{\beta\theta\,\mathrm{I}\,r\,\omega}{k\lambda\varepsilon}}\,\mu\,\psi_1\,(m\mu) \tag{23}$$

avec

$$\psi_1\,(m\mu) = \frac{15{,}5\,m\mu}{(0{,}785\,m\mu + 1{,}06)\,(4{,}94\,m\mu + 3{,}46)}\times \sqrt{\frac{(m\mu + 0{,}7)\,(0{,}236 + 1{,}256\,m\mu)}{258\,(26{,}5 + 19{,}6\,m\mu)}}.$$

Digitized by Google

Dans l'un ou l'autre cas, ayant fixé μ par comparaison, on détermine m par application des égalités (22) ou (23), en s'aidant de tables ou graphiques fournissant les valeurs de f_1 ($m\,\mu$) et ψ_1 ($m\,\mu$).

Généralement on est amené à retoucher le premier résultat de ce calcul de $m\,\mu$, la formule (20) donnant pour p une quantité fractionnaire. Il faut alors modifier un ou plusieurs des paramètres φ, θ, λ, β, δ (ou B), de façon à obtenir une valeur de $m\,\mu$ conduisant à un nombre entier de paires de pôles.

Finalement on calcule D et L en se servant des relations (5) et (2) :

$$D = \sqrt[3]{\frac{258\,p\,w}{(m\,\mu + 0{,}7)\,N}} \qquad L = \frac{1{,}256\,m\,\mu\,D}{p}$$

Touchant l'établissement du collecteur (rectification de a) et la fixation définitive de n, nous renvoyons à ce qui a été dit, page 13, au sujet des machines bipolaires. Remarquons ici que la conservation de $F = \lambda\,\varepsilon/\beta$ s'impose, ne fût-ce qu'en raison de la détermination préalable de p (20).

Une autre méthode consiste à s'imposer, outre μ, la *forme* des pièces polaires (page 399), c'est-à-dire m. On obtient alors facilement, au moyen de la formule (20), le nombre de pôles, après ajustement convenable des coefficients arbitraires. Seulement, dans ce procédé de calcul, ayant fixé φ on ne peut plus [1] choisir arbitrairement δ ou B comme précédemment : les valeurs de ces dernières

[1] Sauf, cependant, si l'on cesse de considérer l'une au moins des quantités θ, β et λ comme donnée arbitraire. Dans ce cas, le plus commode, pour la suite, serait de faire de θ l'objet d'un calcul, plutôt que de déterminer λ ou β : la rectification de a (p. 408) s'exécuterait plus librement.

Digitized by Google

quantités se déduisent respectivement des relations (22) et (23).

b) *Méthodes de calcul des armatures à bobinage en série simple.*

Nous avons dans ce cas $c = 1$; par suite les relations (2) et (12) nous conduisent de nouveau à la formule (17), déjà indiquée à propos des machines bipolaires (p. 406). On obtient ainsi m après avoir fixé μ par comparaison.

Supposons qu'on se donne l'entrefer simple δ. Les égalités (14) et (5) permettent d'écrire :

$$\varphi \delta = \frac{15{,}5\, I\, r\, \theta}{k e} \sqrt[3]{\frac{N\, w^2}{258\, p} \frac{m\, \mu^2 \sqrt[3]{m\, \mu + 0{,}7}}{(0{,}785\, m\, \mu + 1{,}06)\,(4{,}94\, m\, \mu + 3{,}46)}}.$$

On en tire

$$p = \frac{14{,}43\, N\, w^2\, (I\, r\, \theta\, \mu)^3}{(k\, e\, \varphi\, \delta)^3} f_2 (m\, \mu) \qquad (24)$$

en posant

$$f_2 (m\, \mu) = \frac{(m\, \mu + 0{,}7)\,(m\, \mu)^3}{(0{,}785\, m\, \mu + 1{,}06)^3\,(4{,}94\, m\, \mu + 3{,}46)^3}.$$

Si l'on préfère s'imposer une loi de la forme $\delta = B \sqrt{D}$ on obtient de façon analogue :

$$p = \frac{0{,}932\, N\, w\, (I\, r\, \theta\, \mu)^2}{(k\, e\, \varphi\, B)^2} \psi_2 (m\, \mu) \qquad (25)$$

avec

$$\psi_2 (m\, \mu) = \frac{(m\, \mu + 0{,}7)\,(m\, \mu)^2}{(0{,}785\, m\, \mu + 1{,}06)^2\,(4{,}94\, m\, \mu + 3{,}46)^2}.$$

Quel que soit le procédé suivi, on doit généralement retoucher les calculs, comme dans le cas des armatures bobinées en parallèle simple, pour que la valeur définitive de p soit un nombre entier.

Ici encore il est commode d'utiliser des tables ou graphiques fournissant les valeurs de $f_2 (m\, \mu)$ ou $\psi_2 (m\, \mu)$.

Digitized by Google

Pour la suite des calculs, la marche à suivre est semblable à celle indiquée précédemment à propos des armatures bobinées en parallèle simple : nous n'insisterons donc pas.

c) *Dispositions usitées dans la construction, par séries, des dynamos multipolaires.*

Ainsi que nous l'avons fait dans le cas des machines bipolaires, examinons l'éventualité de l'emploi des mêmes tôles d'armatures pour plusieurs machines d'une série.

Les conditions à observer en de telles circonstances (quel que soit le genre de bobinage de l'induit) sont, en vertu de (5) et (2) :

$$\frac{p\,w}{(m\mu + 0{,}7)\,\mathrm{N}} = \frac{p'\,w'}{(m'\,\mu' + 0{,}7)\,\mathrm{N}'}$$

$$\frac{p\,\mathrm{L}}{\mu\,m} = \frac{p'\,\mathrm{L}'}{\mu'\,m'}$$

d'où l'on tire :

$$\frac{\mathrm{L}'}{\mathrm{L}} = \frac{w'\,\mathrm{N}}{w\,\mathrm{N}'}\left(1 + \frac{0{,}7}{m\,\mu}\right) - \frac{0{,}7\,p}{p'\,m\,\mu}$$

Introduisant l'expression de L' en fonction de p' — déduite de cette dernière relation — dans l'égalité (12) appliquée à la nouvelle machine étudiée, on obtient une équation (du premier ou du second degré, suivant qu'il s'agit d'une armature bobinée en série ou en parallèle) qui permet de calculer p'. La valeur obtenue, en général fractionnaire, doit être rectifiée de manière à fournir un nombre entier de paires de pôles : pour satisfaire néanmoins à la relation (12) il faut alors modifier convenablement la chute ohmique $\mathrm{I}r$ (dans le cas où l'on désire conserver les autres paramètres k, λ, ε, β, θ).

Digitized by Google

En ce qui concerne l'utilisation d'une même spécification d'armature dans plusieurs machines tournant à des vitesses angulaires différentes, les considérations développées à propos des machines bipolaires restent entièrement applicables (p. 411).

J. KÜNTZIGER.

Digitized by Google

021.316 **Notes relatives au calcul des réseaux électriques.**

INTRODUCTION

Le problème des réseaux électriques peut s'énoncer comme suit :

« Etant donnée la valeur des courants à distribuer dans un réseau et la position des centres d'alimentation, déterminer la section des conducteurs. »

Ainsi posé, le problème est indéterminé, et pour le résoudre, il est nécessaire de faire appel à des conditions secondaires : sécurité (densité maxima de courant), chute de tension maxima en ligne, économie (au double point de vue du poids de cuivre et de la perte en ligne.) Pratiquement, on cherchera à utiliser les sections courantes du commerce.

Cela étant, on peut employer deux méthodes de calcul différentes :

1°) Se fixer des sections de cuivre pour les différents conducteurs et vérifier si les conditions secondaires sont satisfaites ;

2°) S'imposer certaines conditions secondaires et en déduire les sections de cuivre.

Les méthodes décrites dans les *Leçons sur l'Electricité*, du professeur Eric Gerard (1), et dans le *Bulletin des Ingénieurs sortis de l'Institut Montefiore* (2) se rapportent à

(1) Voir E. Gerard : *Leçons sur l'Electricité*, tome II, 7e édition, pages 170 et suivantes.

(2) Voir *Bulletin de l'Association des Ingénieurs sortis de l'Institut Montefiore.* — Années 1890 et 1900.

Digitized by Google

la première méthode ; elles conduisent à des calculs de vérification fort laborieux, et le choix préalable des sections expose les commençants à devoir recommencer ces calculs plusieurs fois.

Les présentes notes constituent un essai de résolution du problème par la deuxième méthode. Elle permet de calculer les sections, soit de façon à n'avoir qu'une chute de tension déterminée, soit de façon à ne pas dépasser une certaine densité de courant, et cela directement, au moyen d'équations linéaires à une seule inconnue.

L'inconvénient de cette méthode consiste en ce que les dimensions trouvées ne sont pas des sections du commerce ; on prendra les plus voisines.

Une comparaison fera mieux saisir la portée de ces notes. Pour le calcul d'une machine électrique, on peut suivre également deux voies différentes :

1°) Se fixer, par comparaison avec des machines existantes, certaines données (par exemple, des dimensions de tôles, des nombres d'encoches, etc.), puis achever le calcul de façon à remplir les conditions demandées, et enfin vérifier si les valeurs des densités de courant, des échauffements, des inductions maxima, des rendements, etc., sont acceptables. C'est le procédé le plus courant en pratique, étant donné que généralement on a établi une série de machines, et que si l'on a à calculer une machine spéciale sortant de la série, on cherche à utiliser les tôles, lames de collecteur, dimensions de cuivre, poinçons, etc., courants ;

2°) Se fixer des densités de courant maxima, des inductions, des vitesses périphériques, etc., et en déduire les dimensions de la machine. C'est la méthode exposée dans la plupart des traités. Elle s'adresse plus particulièrement aux débutants. Néanmoins les déductions auxquelles elle conduit sont également très utiles aux praticiens.

Digitized by Google

C'est le procédé correspondant pour le calcul des réseaux que nous avons tenté d'aborder dans les présentes notes.

PREMIÈRE PARTIE.

I. — Bases de la méthode.

Alors que les procédés connus [1] de calcul des réseaux sont basés sur le choix *a priori* des sections des branchements, d'où l'on déduit les intensités de courant, les procédés que nous indiquerons dans les présentes notes sont basés sur le choix ou la prédétermination de l'intensité des courants, d'où l'on déduira des valeurs convenables pour les sections.

Cette façon d'opérer présente un double avantage : 1°) au point de vue du choix ; 2°) au point de vue des calculs.

1°) *Au point de vue du choix.* — Il est plus facile de se donner des valeurs convenables de l'intensité du courant que de choisir des sections, le choix de ces dernières étant généralement basé sur l'intuition du courant qui circulera dans le conducteur. De plus, le choix du courant peut être guidé d'après certaines règles simples qui aideront l'intuition ; nous exposerons quelques-unes de ces règles et nous en montrerons l'application à des exemples.

2°) *Au point de vue des calculs.* — Comme dans le choix des courants, on est conduit naturellement à satisfaire à la seconde loi de Kirchoff (la somme algébrique des courants en chaque nœud est nulle), les seules équations qui restent à satisfaire sont celles exprimant la première loi de Kirchoff. Il en résulte que le nombre des équations est réduit ; il est inférieur au nombre des inconnues (sections

[1] Voir notes page 417.

Digitized by Google

des branchements). Ce fait permet de choisir quelques-unes des inconnues, de façon à satisfaire à certaines conditions secondaires, et il reste pour la détermination des autres inconnues des équations qui sont généralement à une seule inconnue.

2. — Généralités.

I. *Formules.* — Tous les calculs qui suivent se ramènent, comme nous venons de l'expliquer, à la résolution d'équations exprimant la première loi de Kirchoff ; c'est pourquoi il est utile de montrer sous quelles formes elles se prètent le mieux au calcul que nous considérons et d'en déduire immédiatement quelques observations d'ordre général.

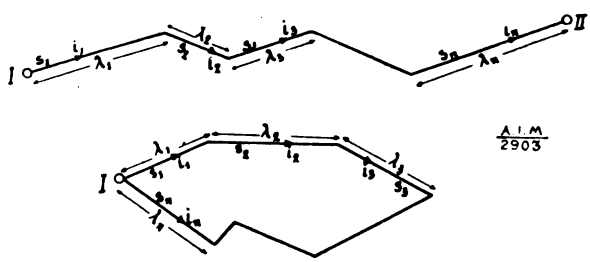


Fig. 1.

Etant donné un réseau quelconque, où la place des centres d'alimentation (supposés au même potentiel) est déterminée, détachons-en un circuit joignant deux de ces centres d'alimentation I et II, ou bien un circuit fermé ne comprenant qu'un seul centre d'alimentation I (fig. 1). Ce circuit est divisé en tronçons de sections différentes : s_1, s_2..... — s_n, dont les longueurs sont respectivement représentées par λ_1, λ_2,..... — λ_n.

Deux cas peuvent se présenter :

Digitized by Google

1°) *Chacun des tronçons considérés est parcouru dans toute sa longueur par le même courant.*

Désignons par i_1, i_2,..... i_n les courants parcourant respectivement les tronçons λ_1, λ_2..... λ_n (fig. 1).

La première loi de Kirchoff appliquée au circuit considéré donne :

$$i_1 \frac{\lambda_1}{s_1} + i_2 \frac{\lambda_2}{s_2} + \cdots\cdots + i_n \frac{\lambda_n}{s_n} = 0.$$

Désignons par δ_1, δ_2. . . . . δ_n, les densités de courants des différents tronçons, l'équation précédente s'écrira :

$$\lambda_1 \delta_1 + \lambda_2 \delta_2 + \cdots\cdots + \lambda_n \delta_n = 0. \qquad (1)$$

Sous cette forme, l'équation montre que si l'on désire avoir les valeurs absolues des différentes densités δ_1, δ_2, δ_n égales entre elles, condition qui paraît désirable, il faut que *la somme des longueurs des tronçons parcourus par un sens déterminé de courant soit égale à la somme des longueurs des autres tronçons.*

En pratique, on ne peut guère espérer pouvoir satisfaire à une telle condition, mais on a généralement avantage (au point de vue de la constance de la densité) à s'en rapprocher le plus possible. Il est intéressant de remarquer que cette règle ne fait intervenir que des longueurs.

2°) *Les tronçons considérés sont composés de plusieurs portions parcourues par des courants différents.*

Dans ce cas, la formule (1) peut être généralisée ; il suffira d'examiner ce que devient un des termes quelconques $\lambda \delta$ de cette équation. Ce terme représente la chute de tension dans le tronçon considéré, si l'on suppose la résistivité des conducteurs égale à l'unité.

Soit A B (fig. 2) le tronçon considéré, de longueur λ et de section s, formé des portions $\lambda' \lambda''$,. . . . . λ^m parcourues respectivement par les courants $i' i''$. . . . . i^m, i' étant le

Digitized by Google

plus grand en valeur absolue ; les courants dérivés sont représentés par α', α'',..... α^{m-1}. Les longueurs l' l''..... l^{m-1} sont celles indiquées fig. 2.

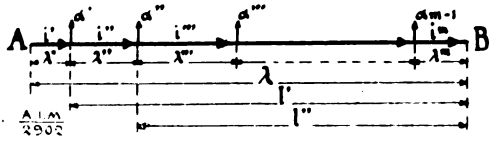


Fig. 2.

Dans ces conditions, le terme $\lambda\,\delta$ pour le tronçon considéré peut s'inscrire sous les formes suivantes :

$$\lambda\,\delta = \frac{i'\lambda}{s} - \frac{\alpha' l'}{s} - \frac{\alpha'' l''}{s} - \ldots\ldots - \frac{\alpha^{m-1}\, l^{m-1}}{s}$$

$$- \frac{i'}{s}\left(\lambda - \frac{\alpha' l'}{i'} - \frac{\alpha'' l''}{i'} - \ldots\ldots - \frac{\alpha^{m-1}\, l^{m-1}}{i'}\right)$$

$$= \frac{i'}{s}\left(\lambda - \frac{\Sigma\,\alpha l}{i'}\right).$$

Désignons par Δ le rapport i'/s qui est la densité de courant maxima du tronçon A B considéré, et posons par définition :

$$L \equiv \lambda - \frac{\Sigma\,\alpha l}{i'}$$

il vient :

$$\lambda\,\delta = L\,\Delta.$$

Par suite, la formule (1) généralisée pourra s'écrire sous la forme :

$$L_1\,\Delta_1 + L_2\,\Delta_2 + \ldots\ldots + L_n\,\Delta_n = 0 \qquad (I')$$

qui exprime la première loi de Kirchoff pour les circuits représentés figure 1, et dans laquelle chacun des termes se rapporte à un tronçon de section constante ; chacun

Digitized by Google

est égal au *produit de la densité maxima dans ce tronçon par une longueur L, définie par la formule suivante :*

$$L = \lambda - \frac{\Sigma \alpha l}{i'} \qquad (2)$$

valeur indépendante de la section du tronçon considéré.

II. *Marche à suivre.* — Etant donné un réseau dont les centres d'alimentation sont connus :

1°) On déterminera les intensités de courant soit par intuition, soit en s'aidant des règles que nous exposerons plus loin, en tenant compte de la seconde loi de Kirchoff ;

2°) On calculera les expressions L pour chacun des tronçons considérés ;

3°) On écrira les différentes équations de la forme (I') qui satisfont à la première loi de Kirchoff ;

4°) Le nombre de ces équations étant inférieur au nombre des inconnues Δ, on choisira le plus judieusement possible les valeurs de quelques-unes de ces inconnues (le nombre des inconnues à choisir est égal au nombre de nœuds du réseau, c'est-à-dire au nombre d'équations qui devraient exprimer la seconde loi de Kirchoff, si celle-ci n'était déjà satisfaite par le choix des courants) et l'on déduira les autres des équations dans lesquelles on aura remplacé les inconnues choisies par leurs valeurs ;

5°) Les densités maxima Δ étant déterminées, on en déduira immédiatement les valeurs des sections des différents tronçons, données par des formules de la forme :

$$s = \frac{i'}{\Delta}.$$

III. *Remarques.* — 1°) Nous croyons utile de faire remarquer que la forme (I') des équations, dans lesquelles on a pris comme inconnues les densités Δ au lieu des sections s, a été choisie avec intention. En effet, étant

Digitized by Google

donné que l'on est appelé à choisir quelques-unes des inconnues, il est préférable d'avoir à choisir des densités qui doivent généralement répondre à certaines conditions, tandis que le choix des sections serait très indéterminé.

2°) Les différentes inconnues Δ étant déterminées, si l'on juge que l'une d'elles n'est pas convenable, il ne sera pas nécessaire de recommencer tous les calculs, on pourra modifier plus ou moins les valeurs des autres inconnues, pourvu que les équations (I') soient toujours satisfaites. On remarquera à ce propos :

a) Les équations (I') étant homogènes, on pourra multiplier ou diviser toutes les inconnues Δ par un même nombre.

b) Considérons deux des termes $L_r \Delta_r$ et $L_s \Delta_s$ d'une des équations. Si les valeurs de L_r et L_s sont de même signe, on pourra augmenter la densité de l'un à condition de diminuer celle de l'autre ; si, au contraire, les valeurs de L_r et L_s sont de signes contraires, il faudra augmenter ou diminuer les deux densités à la fois.

c) Si toutes les valeurs Δ sont convenables, excepté celle d'un des tronçons, on pourra subdiviser ce dernier en deux ou plusieurs portions de sections différentes, et l'on pourra, par exemple, choisir les valeurs Δ de ces portions, de façon que la somme de leurs : $L \Delta$ soit égale au $L \Delta$ primitivement prévu pour le tronçon considéré.

3. — Applications.

Les méthodes de calcul des réseaux que nous examinerons dans ce paragraphe et que nous appliquerons à des exemples diffèrent simplement par la façon de déterminer les valeurs des courants ; pour le reste, nous suivrons simplement la marche que nous venons d'indiquer.

Comme condition secondaire, nous admettrons, dans ces applications, que la seule à considérer est de ne pas

Digitized by Google

dépasser pour les différentes densités Δ une valeur déterminée, valeur que pour plus de simplicité nous supposerons égale à l'unité. (Si cette valeur devait être pratiquement différente, il suffirait de multiplier ou de diviser toutes les sections trouvées par un même nombre). Nous admettrons, d'autre part, qu'il y a avantage à ce que toutes les densités Δ soient sensiblement égales entre elles.

I. *Moyen direct.* — Le moyen le plus simple consiste à choisir directement au sentiment les valeurs des courants en observant la première loi de Kirchoff.

On pourra utilement se rappeler la règle énoncée, page 5, et d'après laquelle on divisera les circuits joignant les centres d'alimentation (ou les circuits fermés) aussi exactement que possible en deux parties égales parcourues par des courants de sens opposés, en observant que si l'on veut éviter d'avoir un tronçon parcouru par un courant nul, il convient de choisir le point de sépa-

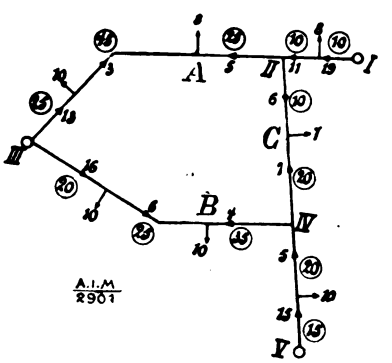


Fig. 3.

ration des courants là où se trouve une dérivation de courant. Si les deux parties ne sont pas égales, il y aura généralement avantage à augmenter la partie de courant amené au point de séparation par la partie la plus courte.

Digitized by Google

Exemple : Nous nous proposons de calculer les éléments du réseau représenté (fig. 3).

Les nombres entourés d'un cercle désignent les longueurs des portions parcourues par un même courant. Les points I, III, V sont des centres d'alimentation (supposés au même potentiel).

1. Les courants indiqués sur la figure ont été choisis en tenant compte des considérations indiquées ci-dessus.

Ainsi, le circuit I, III, se divise le mieux au point A qui demande 8 ampères. Au lieu de faire débiter la moitié, c'est-à-dire quatre ampères, par chacun des côtés, nous avons choisi cinq ampères pour le côté II A, cela parce que la longueur I A égale à 45, est plus courte que la longueur III A, égale à 70.

Le choix des courants en B et C a été guidé par des raisonnements analogues.

Les autres valeurs des courants dans les différents tronçons s'en déduisent par l'application de la seconde loi de Kirchhoff. (Voir fig. 3.)

2. Nous choisissons comme tronçons, ayant une section constante sur toute leur longueur, tous ceux compris entre deux nœuds, ou entre un nœud et un centre de distribution.

Calculons les longueurs L relatives à chacun de ces tronçons :

Tronçon III II $L_1 = 95 - \frac{8 \times 25 + 10 \times 70}{13} = 25{,}8$

» II I $L_2 = 20 - \frac{8 \times 10}{19} = 15{,}8$

» II IV $L_3 = 30 - \frac{7 \times 20}{6} = 6{,}7$

» III IV $L_4 = 80 - \frac{10 \times 35 + 10 \times 60}{16} = 20{,}6$

» V IV $L_5 = 35 - \frac{10 \times 20}{15} = 21{,}7$

Digitized by Google

3. On en déduit, par exemple, les équations (I') suivantes :

Circuit I II III : $25{,}8\,\Delta_1 - 15{,}8\,\Delta_2 = 0$ (1)

» I II IV III : $15{,}8\,\Delta_2 + 6{,}7\,\Delta_3 - 20{,}6\,\Delta_4 = 0$ (2)

» III IV V : $20{,}6\,\Delta_4 - 21{,}7\,\Delta_5 = 0$ (3)

4 et 5. Dans ce système de trois équations à cinq inconnues, deux valeurs de Δ sont indéterminées.

Ces équations montrent qu'il convient de donner à Δ_2 et à Δ_4 leur valeur maxima, soit l'unité ; ces valeurs étant introduites dans les équations, on trouve les valeurs Δ suivantes, ainsi que les sections correspondantes :

$\Delta_2 = 1$ $\qquad s_2 = 19^{mmq}$

$\Delta_4 = 1$ $\qquad s_4 = 16^{mmq}$

$\Delta_1 = \frac{15{,}8}{25{,}8} = 0{,}613$ $\qquad s_1 = 21^{mmq},2$ (1)

$\Delta_5 = \frac{20{,}6}{21{,}7} = 0{,}95$ $\qquad s_5 = 15^{mmq},8$

$\Delta_3 = \frac{20{,}6 - 15{,}8}{6{,}7} = \frac{4{,}8}{6{,}7} = 0{,}717$ $\qquad s_3 = 8^{mmq},37$

II. *Moyens méthodiques.* — Les moyens méthodiques que nous indiquerons ici sont basés sur la double constatation suivante :

1°) *Un circuit complexe quelconque peut toujours être décomposé en circuits simples :*

Nous désignons sous le nom de *circuit simple* un circuit joignant deux centres d'alimentation (ou bien un circuit fermé) et pour lequel toutes les prises de courant sont connues.

(1) Nous croyons intéressant de faire remarquer que si l'on calcule les valeurs de Δ à la règle à calcul, on pourra lire sur celle-ci les valeurs correspondantes de s sans nouveau glissement.

Digitized by Google

Comme exemple d'une telle décomposition, on peut se reporter aux figures 4 et 7 qui représentent respectivement une décomposition en circuits simples des circuits complexes représentés par les figures 3 et 6.

2°) *Les courants alimentant un circuit simple peuvent se déterminer par le calcul.*

En effet, soit AB (fig. 2, page 422) un circuit simple où nous supposons que A et B représentent deux centres d'alimentation.

On pourra faire différentes hypothèses, par exemple :

A) *la section du circuit sera constante sur toute sa longueur.*

Comme la chute de tension du circuit est nulle, il vient (voir page 4) :

$$\lambda \delta = \frac{i'}{s}\left(\lambda - \frac{\Sigma \alpha l}{i'}\right) = o$$

d'où :

$$i' = \frac{\Sigma \alpha l}{\lambda}. \qquad \text{(III)}$$

La valeur de i' étant ainsi déterminée, toutes les autres intensités de courants s'en déduiront.

B) *la densité de courant sera la même sur toute la longueur du circuit.*

La chute de tension du circuit étant nulle, on peut écrire :

$$\lambda' \delta' + \lambda'' \delta'' + \ldots\ldots + \lambda^m \delta^m = o \qquad \text{(IV)}$$

δ', δ'', ... δ^m, représentant les valeurs avec leurs signes des densités de courant.

L'équation (IV) montre que, pour que les valeurs absolues des densités puissent être égales entre elles, il faudrait par exemple pouvoir diviser le circuit en deux parties de longueurs égales, parcourues par des courants de sens opposés.

Comme nous l'avons déjà fait remarquer, dans les

Digitized by Google

exemples pratiques cette condition ne peut généralement être satisfaite qu'approximativement. Remarquons que, dans certains cas, on peut être amené à diviser le circuit en un point où il n'y a pas de dérivation de courant ; dans ce cas, le tronçon comprenant ce point de division ne sera parcouru par aucun courant.

Marche à suivre :

De ce qui précède, nous pouvons déduire que pour déterminer méthodiquement les courants d'un circuit complexe quelconque, il suffit de le subdiviser en circuits simples pour lesquels on déterminera les courants en faisant une des deux hypothèses que nous venons d'examiner. De là résultent deux solutions de la question que nous distinguerons par les dénominations : *solution par la section constante et solution par la densité constante.*

Généralement, il y aura avantage à utiliser la première solution pour les circuits courts débitant peu de courant, et, au contraire, la seconde solution pour les circuits longs, surtout si la distribution du courant y est assez irrégulière.

Les courants étant déterminés, on calculera les sections des tronçons comme nous l'avons vu plus haut.

Dans la décomposition en circuits simples, certains tronçons du circuit complexe sont divisés en deux ou plusieurs parties (par exemple : tronçon I II, fig. 4) ; il convient de répartir convenablement les courants à débiter par ce tronçon entre les différentes parties ; on pourra par exemple les diviser en parties égales ; c'est ce que nous ferons dans les deux exemples qui suivent :

A) *Solution par la section constante.*

Reprenons l'exemple déjà traité (fig. 3). On est conduit à faire la décomposition en circuits simples comme l'indique la figure 4.

1. Dans cet exemple l'application de la solution par la

Digitized by Google

section constante est la plus rationnelle, les circuits étant courts et la distribution des courants assez régulière.

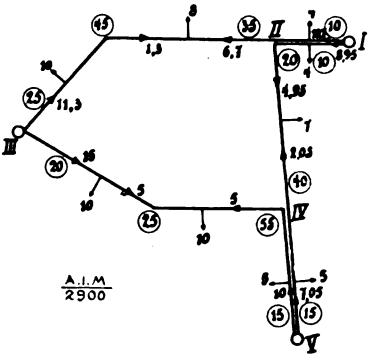


Fig. 4.

L'application de la formule (III) donnera pour les courants de chacun des trois circuits simples les valeurs suivantes :

Circuit III II I :

$$i' = \frac{4 \times 10 + 8 \times 45 + 10 \times 90}{115} = \frac{1300}{115} = 11^{A},3$$

Circuit III IV V :

$$i' = \frac{5 \times 15 + 10 \times 70 + 10 \times 95}{115} = \frac{1725}{115} = 15^{A}$$

Circuit I II IV V :

$$i' = \frac{5 \times 15 + 7 \times 55 + 4 \times 75}{85} = \frac{760}{85} = 8^{A}95$$

De ces valeurs résulte la distribution des courants indiquée figure 5.

2. Calculons les quantités L pour chaque tronçon de section constante (nous avons admis une section constante pour chaque tronçon compris entre deux nœuds) ; il vient :

Digitized by Google

Tronçon III II $L_1 = 95 - \frac{8 \times 25 + 10 \times 70}{11,3} = 15,4$

» II I $L_2 = 20 - \frac{8 \times 10}{19,65} = 15,93$

» II IV $L_3 = 30 - \frac{7 \times 20}{4,95} = 1,75$

» III IV $L_4 = 80 - \frac{10 \times 35 + 10 \times 60}{15} = 16,8$

» V IV $L_5 = 35 - \frac{10 \times 20}{17,05} = 23,28$

3. Les équations (I') s'écrivent alors :

Circuit III II I : $15,4\,\Delta_1 - 15,93\,\Delta_2 = 0$ (1)

» III II IV : $15,4\,\Delta_1 + 1,75\,\Delta_3 - 16,8\,\Delta_4 = 0$ (2)

» III IV V : $16,8\,\Delta_4 - 23,28\,\Delta_5 = 0$ (3)

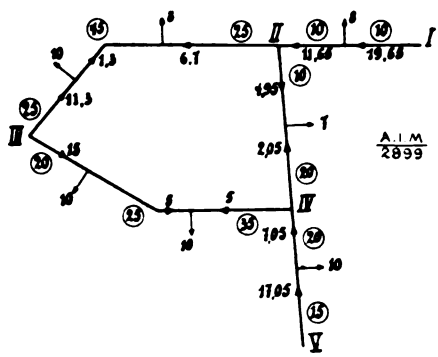


Fig. 5.

4 et 5. Comme on a cinq inconnues à déterminer et trois équations seulement, on est conduit à choisir deux des quantités Δ.

L'examen des équations (1), (2), (3) montre qu'il faut donner à Δ_1 et à Δ_4 leur valeur maxima, c'est-à-dire l'unité.

Digitized by Google

Par suite, il en résulte pour les différentes densités maxima et les sections des tronçons correspondants les valeurs suivantes :

$$\Delta_1 = 1 \qquad s_1 = 11^{mmq},3$$
$$\Delta_4 = 1 \qquad s_4 = 15^{mmq}$$
$$\Delta_2 = \frac{15,4}{15,93} = 0,967 \qquad s_2 = 20^{mmq},4$$
$$\Delta_5 = \frac{16,8}{23,38} = 0,73 \qquad s_5 = 23^{mmq},6$$
$$\Delta_3 = \frac{16,8 - 15,4}{1,75} = 0,81 \qquad s_3 = 6^{mmq},18$$

Au point de vue de la constance de la densité, cette solution est meilleure que celle obtenue précédemment, ce qui tend à prouver l'utilité du procédé méthodique, mais c'est là une conclusion dont il ne faut pas exagérer la portée.

B) *Solution par la densité constante.*

Reprenons l'exemple (fig. 6) traité par la méthode de Herzog et Stark, dans les *Leçons sur l'Electricité* (1).

1. Nous effectuerons la division en circuits simples comme l'indique la figure 7. Dans le circuit, le point A seul est un centre d'alimentation. On peut se rendre compte dans cet exemple que l'application de la solution par la section constante serait peu convenable car, à cause de la distribution peu régulière des courants à débiter, on prévoit facilement que la section du tronçon BHE, par exemple, sera assez notablement différente de AD.

Appliquons donc la seconde solution.

Les sens des courants admis sont indiqués fig. 7; chacun

(1) Voir E. Gerard : *Leçons sur l'Electricité*, tome II, 7e édition, page 172. Les nombres entourés d'un cercle (fig. 6) désignent les longueurs des portions du circuit parcourues par un même courant.

Digitized by Google

des deux circuits simples fermés a été divisé aussi exactement que possible en deux parties égales parcourues par des sens de courants opposés.

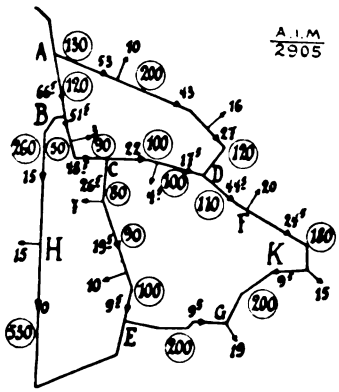


Fig. 6.

Le milieu de ADGEHA se trouvant *entre* E *et* G, AB n'alimente donc que le point H, soit 15 ampères ; le reste du circuit simple est alimenté par le côté AD.

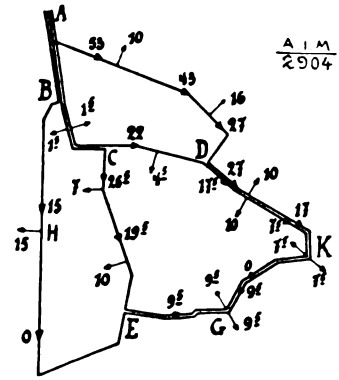


Fig. 7.

De même, le milieu de ACEDCA se trouvant entre K et G, le courant de K à G pour ce circuit sera nul.

Digitized by Google

Finalement, les courants se distribueront dans le circuit complexe comme le montre la figure 6.

2. Calculons les expressions L, pour chaque tronçon de section constante, c'est-à-dire pour AB, BC, CD, AD, DGE, CE, BHE.

Tronçon AB

$$L_1 = 120$$

Tronçon BC

$$L_2 = 140 - \frac{3 \times 90}{51,5} = 134,75$$

Tronçon CD

$$L_3 = 200 - \frac{4,5 \times 100}{22} = 179,55$$

Tronçon AD

$$L_4 = 450 - \frac{16 \times 120 + 10 \times 320}{53} = 353,7$$

Tronçon DGE

$$L_5 = 690 - \frac{19 \times 200 + 15 \times 400 + 20 \times 580}{44,5} = 209$$

Tronçon CE

$$L_6 = 270 - \frac{10 \times 100 + 7 \times 190}{26,5} = 182$$

Tronçon BHE

$$L_7 = 790 - \frac{15 \times 530}{15} = 260$$

3. Les équations (I') appliquées à chacune des mailles fermées s'écrivent :

Maille ABCDA :

$$120\,\Delta_1 + 134,75\,\Delta_2 + 179,55\,\Delta_3 - 353,7\,\Delta_4 = 0 \qquad (1)$$

Maille CDGEC :

$$179,55\,\Delta_3 + 209\,\Delta_5 - 182\,\Delta_6 = 0 \qquad (2)$$

Digitized by Google

Maille BCEHB :

$$134{,}75\ \Delta_2 + 182\ \Delta_6 - 260\ \Delta_7 = 0 \qquad (3)$$

4. L'examen des équations montre qu'il n'y a pas moyen d'avoir tous les Δ sensiblement égaux entre eux. Il y aurait donc avantage à modifier la répartition des courants.

Mais comme nous ne donnons celle-ci qu'à titre d'exemple, nous préférons la conserver en montrant le parti que l'on peut en tirer.

Les équations (1), (2), (3) ayant 7 inconnues, 4 sont indéterminées.

Les trois équations (2) et (3) sont les plus difficiles à satisfaire si l'on désire avoir des Δ sensiblement égaux. Additionnons ces deux équations, il vient :

$$179{,}55\ \Delta_3 + 134{,}75\ \Delta_2 + 209\ \Delta_5 - 260\ \Delta_7 = 0 \qquad (4)$$

Cette équation montre qu'il convient de choisir Δ_7 aussi grand que possible, c'est-à-dire égal à l'unité. Pour satisfaire cette équation (4) les valeurs de Δ_3, Δ_2, Δ_5 devraient être très petites, donc peu convenables ; c'est pourquoi nous décomposerons le tronçon 5 (DGE), le plus grand des trois, en deux parties de sections différentes s'_5 et s''_5 par le point G. [1]. Les valeurs L relatives à ces deux parties valent :

$$L'_5 = 490 - \frac{15 \times 200 + 20 \times 380}{44{,}5} = 252$$

$$L''_5 = 200$$

Dans ces conditions, le terme $209\ \Delta_5$ des équations (2) et (4) est égal à :

$$209\ \Delta_5 = 252\ \Delta'_5 - 200\ \Delta''_5.$$

(1) Dans la solution donnée dans les *Leçons sur l'Electricité*, ce tronçon a été divisé en trois parties de sections différentes.

Digitized by Google

On pourra prendre, par exemple : $\Delta'_5 = \Delta''_5 = 1$, ce qui donne :

$$209\,\Delta_5 = 52.$$

Portons cette valeur et celle de Δ_7 dans les équations (2) et (3) ; elles deviennent

$$179{,}55\,\Delta_3 + 52 - 182\,\Delta_6 = 0 \qquad (2')$$

$$134{,}75\,\Delta_2 + 182\,\Delta_6 - 260 = 0 \qquad (3')$$

Comme le tronçon 6 (CE) est plus long que le tronçon 2 (BC), ces équations montrent qu'il y a avantage à choisir $\Delta_6 = 1$.

Dans ces conditions, l'équation (1) se ramène à :

$$120\,\Delta_1 - 353{,}7\,\Delta_4 + 208 = 0 \qquad (1')$$

qui conduit à choisir $\Delta_1 = 1$.

5. On aura donc les valeurs suivantes des Δ et des sections correspondantes :

	$\Delta_7 = 1$	$s_7 = 15$
	$\Delta'_5 = 1$	$s'_5 = 44{,}5$
	$\Delta''_5 = 1$	$s''_5 = 9{,}5$
	$\Delta_6 = 1$	$s_6 = 26{,}5$
	$\Delta_1 = 1$	$s_1 = 66{,}5$
(2')	$\Delta_3 = \dfrac{182 - 52}{179{,}55} = 0{,}725$	$s_3 = 30{,}4$
(3')	$\Delta_2 = \dfrac{260 - 182}{134{,}75} = 0{,}58$	$s_2 = 88{,}8$
(1')	$\Delta_4 = \dfrac{120 + 208}{353{,}7} = 0{,}928$	$s_4 = 57{,}2$

Comparaison de cette solution avec celle obtenue par la méthode de Herzog et Stark.

Nous faisons porter la comparaison sur les trois points suivants : volume du cuivre, chute de tension maxima, densité de courant maxima.

Dans cette comparaison, nous avons supposé, pour plus de facilité, que la résistivité du cuivre est égale à l'unité.

Digitized by Google

Solution des « Leçons » page 172.	*Solution précédente.*
DENSITÉ DE COURANT MAXIMA.	
$\frac{73}{70} = 1{,}04$	1
VOLUME DU CUIVRE.	
Tronçons AB : $120 \times 70 =$ 8,400	$120 \times 66{,}5 =$ 7,980
» BC : $140 \times 70 =$ 9,800	$140 \times 88{,}5 =$ 12,450
» CD : $200 \times 50 =$ 10,000	$200 \times 30{,}4 =$ 6,080
» AD : $450 \times 50 =$ 22,500	$450 \times 57{,}2 =$ 25,750
» DGE : $110 \times 50 + 30 \times 180 + 20 \times 400 =$ 18,900	$490 \times 41{,}5 + 200 \times 9{,}5 =$ 23,700
» CE : $270 \times 30 =$ 8,100	$270 \times 26{,}5 =$ 7,150
» BHE : $790 \times 20 =$ 15,800	$790 \times 15 =$ 11,850
93,500	94,960
pour densité maxima égale à 1 : 97,240	
CHUTE DE TENSION MAXIMA EN G.	
$\frac{340 \times 46{,}5}{50} =$ 316	$353{,}7\ \Delta_4 =$ 328
$\frac{110 \times 39{,}5}{50} + \frac{180 \times 19{,}5}{30} + \frac{200 \times 4{,}5}{20} =$ 249	$252\ \Delta'_5 =$ 259
565	580

(A suivre).

LÉON OTS.

Digitized by Google

BIBLIOGRAPHIE.

656 (048) **Traité élémentaire des transports**, par J. CARLIER. — Desoer ; Liége ; 1912.

En rédigeant son ouvrage l'auteur a eu en vue de venir en aide aux étudiants des Facultés techniques en quête de renseignements sur les applications de l'électricité aux chemins de fer et sur les moyens de locomotion nouveaux.

Depuis de longues années, à l'étranger, il a été introduit dans l'enseignement technique des leçons sur l'automobilisme et sur l'aviation. Nous citerons les leçons remarquables données par M. L. Marchis, professeur à la Faculté des sciences de Bordeaux, dès l'année 1904, sur la voiture automobile.

Plus tard, vers 1908, M. Marchis a ajouté à ses leçons sur l'automobilisme des cours sur la navigation aérienne.

A l'Université de Lille, depuis plusieurs années, il existe aussi des cours sur ce sujet.

Enfin, en Sorbonne, le même M. Marchis, le pionnier de la locomotion moderne, enseigne l'aviation depuis bientôt quatre années.

Les seuls cours intéressant les transports, professés dans les Facultés belges, ont trait aux chemins de fer... et, encore, ils ne concernent pas les applications, pourtant si nombreuses, de l'électricité aux chemins de fer !

Il est vrai que les Instituts électrotechniques corrigent chez l'ingénieur, qui en suit les cours, cette absence presque complète de connaissances. A Liége, notamment, M. le professeur Eric Gerard donne une « quintessence » très belle de la traction électrique et des diverses appli-

Digitized by Google

cations de l'électricité aux voies et au matériel des chemins de fer. A ce point de vue là les élèves de l'Institut Montefiore sont éduqués, bien que sommairement, car l'abondance de la matière électrotechnique ne permet pas à M. Gerard d'entrer dans le détail des descriptions très longues et très complètes.

Mais la lacune est complète chez l'ingénieur qui, sorti de l'Université, ne suit pas les cours de l'Institut Montefiore. Il est superflu d'ailleurs d'ajouter combien, à d'autres points de vue encore, ces cours sont indispensables !

Si la lacune est comblée chez l'ingénieur-électricien, pour ce qui est du domaine de l'électricité appliquée aux chemins de fer, elle est encore flagrante pour tout ce qui se rapporte à l'automobilisme sur rails et sur route, ainsi que pour la science de l'aéronautique.

C'est pour compléter sous ce rapport le bagage universitaire que M. Carlier a rédigé ce travail. Il a voulu décrire les divers moyens de locomotion actuels, dans un ouvrage unique, qui dans sa forme est très général et se borne aux principes fondamentaux. Les applications sans nombre de ces principes, que l'auteur a tâché de mettre en évidence, ne sont pas décrites, à dessein, en vue de ne pas surcharger le livre. Au surplus, ne peut-on convenir avec l'auteur, de ce fait, que tous les jours des applications nouvelles des grands principes de construction des voies ferrées et du matériel de chemins de fer se montrent sur nos réseaux et aux Expositions ? Dès lors, se résumer, après avoir établi ou décrit le principe d'une chose — rail, traverse, aiguille, etc. — à en décrire une ou deux applications : celà doit largement suffire à l'étudiant pour lui faire retenir à tout jamais son sujet.

L'auteur a écrit son ouvrage comme si ce livre devait servir de base à un enseignement universitaire des trans-

Digitized by Google

ports qui remplacerait l'enseignement actuel des chemins de fer : il a donc condensé celui-ci, qui ne concerne strictement que la partie mécanique, et a fait place ainsi aux notions nouvelles.

Toutefois, l'auteur a cru nécessaire de s'étendre sur la partie relative aux essais du matériel roulant, parce que le progrès de la locomotion devra toujours chercher là son alimentation. Enfin, l'auteur s'est étendu aussi sur la construction des nouvelles chaudières de locomotives et a mis en lumière la tendance actuelle.

G. L.

ADDENDA.

M. O. Steels nous signale que les questions résumées aux pages 328 à 334 de son récent mémoire intitulé : *Quelques réflexions au sujet des chapitres « Electromagnétisme et Induction » du cours élémentaire d'Electrité* [1] se trouvent développées dans la communication : « *Théorie corpusculaire de l'Electricité* » de M. P. Drumaux, publiée dans le tome IX du *Bulletin Scientifique* (année 1909, fasc. nos 3-4, pp. 117 à 124).

[1] Voir *Bulletin de l'A. I. M.*, tome XIII, 1913, fasc. no 7.

Digitized by Google

MÉMOIRES

621.313.24

Théorie analytique du moteur asynchrone d'induction monophasé.

Sommaire : En négligeant la résistance ohmique du stator, l'extrémité du vecteur représentant le courant absorbé par la machine décrit une circonférence quand la vitesse du rotor varie. Il est aisé de déterminer sur cette courbe les points correspondant au démarrage, au synchronisme, à la nullité du couple. Les ordonnées de cette circonférence, parallèles à l'axe fixe de la force électromotrice appliquée, représentent la puissance absorbée ; l'effet joule dans le rotor est représenté par l'ordonnée d'une ellipse facile à construire ; la différence des ordonnées de la circonférence et de l'ellipse représente la puissance mécanique.

Le glissement peut se calculer aisément, le carré de la vitesse étant proportionnel à une longueur mesurée à partir d'une certaine origine sur une droite fixe. Le couple se calcule ensuite d'après la puissance mécanique et le glissement.

Quand on modifie la résistance du rotor, la circonférence ci-dessus continue à passer par deux points fixes ; les points correspondant au démarrage, au synchronisme, à la nullité du couple décrivent des circonférences faciles à construire. Enfin, les glissements peuvent se déterminer moyennant la construction d'une parabole.

Digitized by Google

§ 1. — Etude analytique.

1. — *Hypothèses. Notations.*

a) *Stator.* — Soit un stator monophasé à $2p$ pôles, de résistance négligeable (la correction ultérieure pour cette résistance se faisant aisément par les procédés graphiques ordinaires), de coefficient de self induction *totale* $\mathcal{L}$ supposé constant, alimenté par une force électromotrice $u = U \sin(kt + \varphi + \alpha)$ et absorbant un courant

$$i = I \sin(kt + \alpha)$$

décalé de φ en retard sur la force électromotrice appliquée, $\cos\varphi$ étant le facteur de puissance du moteur. Nous écrirons $\omega = k/p$.

b) *Rotor.* — Soit un rotor polyphasé de $2p$ pôles, bobiné pour n phases numérotées 0, 1, 2... $(n - 1)$ dans le sens horlogique ; la résistance par phase est r_1 ; le coefficient de self-induction *total* d'une phase, supposé constant, étant λ_{00}, et le coefficient d'induction mutuelle de la phase m vis-à-vis de la phase 0 étant λ_{0m}, nous admettrons que $\lambda_{0m} = \lambda_{00} \cos m\, 2\pi/n$, ce qui revient à supposer une distribution sinusoïdale du flux du rotor dans l'entrefer. On sait que l'on peut faire abstraction de l'induction mutuelle des diverses phases vis-à-vis de l'une d'entre elles O, en remplaçant le coefficient de self-induction vrai λ_{00} de cette phase par un coefficient de self-induction *fictif*.

$$\mathcal{L}_1 = \sum_{m=0}^{m=n-1} \lambda_{0m} \cos m \frac{2\pi}{n} = \frac{1}{2} n \lambda_{00}$$

Nous poserons, pour le courant dans la phase m du rotor

$$i_m = I' \sin\left(k' t - m \frac{2\pi}{n}\right) + I'' \sin\left(k'' t + m \frac{2\pi}{n}\right)$$

Digitized by Google

avec les notations

$$\operatorname{tang}\beta = \frac{k\,\mathcal{L}_1}{r_1} = a\,;\ \operatorname{tang}\beta_1 = \frac{k_1\,\mathcal{L}_1}{r_1} = a_1\,;$$

$$\operatorname{tang}\beta' = \frac{k'\,\mathcal{L}_1}{r_1}\,;\ \operatorname{tang}\beta'' = \frac{k''\,\mathcal{L}_1}{r_1}\,;$$

$$\rho = \sqrt{r^2_1 + k^2\,\mathcal{L}^2_1}\,;\ \rho' = \sqrt{r^2_1 + k'^2\,\mathcal{L}^2_1}\,;\ \rho'' = \sqrt{r^2_1 + k''^2\,\mathcal{L}^2_1}$$

c) *Induction mutuelle entre stator et rotor.* — Nous admettrons que le rotor tourne dans le sens horlogique avec la vitesse angulaire $\omega_1 = k_1/p$ et que le coefficient d'induction mutuelle de la phase m du rotor vis-à-vis du stator est

$$\mu_m = \mathfrak{M}\sin\left(k_1\,t + m\,\frac{2\pi}{n} + \psi\right).$$

Si $\sqrt{2}\,\eta$ est la fraction du flux du stator pénétrant dans une phase du stator au moment où cette fraction est maxima, on aura :

$$\mathfrak{M} = \sqrt{2}\,\eta\sqrt{\mathcal{L}\lambda_{00}} = 2\,\eta\sqrt{\frac{\mathcal{L}\mathcal{L}_1}{n}}$$

d'où

$$\eta^2 = \frac{n\,\mathfrak{M}^2}{4\,\mathcal{L}\mathcal{L}_1}\,;$$

$\sqrt{2}\,\eta$ est donc voisin de 1, mais inférieur à 1. S'il n'y avait pas de dispersion, aurait $\eta^2 = 1/2$.

2. — *Flux d'induction dans le stator ; force contre électromotrice ; puissance absorbée. Valeurs de k' et de k''.*

Le flux d'induction embrassé par l'enroulement statorique est :

$$\mathcal{L}i + \sum_{m=0}^{m=n-1} \mu_m\,i_m = \mathcal{L}\mathrm{I}\sin(kt + \alpha)$$

$$-\frac{n\,\mathfrak{M}\,\mathrm{I}'}{2}\cos[(k_1 + k')\,t + \psi] - \frac{n\,\mathfrak{M}\,\mathrm{I}''}{2}\cos[(k_1 - k'')\,t + \psi]$$

Digitized by Google

et la force *contre* électromotrice développée par la variation de ce flux en fonction du temps est

$$e = k\mathfrak{L}\,\mathrm{I}\cos(kt+\alpha) + \frac{n\,\mathfrak{M}\,\mathrm{I}'}{2}(k_1+k')\sin[(k_1+k')t+\psi)$$
$$-\frac{n\,\mathfrak{M}\,\mathrm{I}''}{2}(k_1-k'')\sin[(k_1-k'')t+\psi]$$

La puissance absorbée par le stator à un moment quelconque est

$$\begin{aligned} ie = {} & k\mathfrak{L}\,\mathrm{I}^2\sin(kt+\alpha)\cos(kt+\alpha) \\ & + \frac{n\,\mathfrak{M}\,\mathrm{I}\mathrm{I}'}{4}(k_1+k')\Big\{\cos[(k-k_1-k')t+\alpha-\psi] \\ & - \cos[(k+k_1+k')t+\alpha+\psi]\Big\} \\ & - \frac{n\,\mathfrak{M}\,\mathrm{I}\,\mathrm{I}''}{4}(k_1-k'')\Big\{\cos[(k-k_1+k'')t+\alpha-\psi] \\ & - \cos[(k+k_1-k'')t+\alpha+\psi]\Big\} \end{aligned}$$

Sa valeur moyenne dans le temps sera nulle à moins que

$$k' = k - k_1 \qquad\qquad k'' = k + k_1$$

ou que l'on n'ait telles autres relations équivalentes.

Si ces conditions sont remplies, la puissance moyenne absorbée par le stator sera :

$$\mathrm{W} = \frac{n\,k\,\mathfrak{M}\,\mathrm{I}}{4}[\mathrm{I}'\cos(\alpha-\psi) - \mathrm{I}''\cos(\alpha+\psi)]$$

et la force *contre* électromotrice du stator sera

$$e = k\mathfrak{L}\,\mathrm{I}\cos(kt+\alpha) + \frac{n\,k\,\mathfrak{M}}{2}[\mathrm{I}'\sin(kt+\psi) - \mathrm{I}''\sin(kt-\psi)]$$

3. — Considérons les trois *fonctions* $\Phi\,\Psi\,\Theta$ désignées ci-après, et qui joueront un rôle important dans le calcul qui va suivre :

Digitized by Google

$$\Phi = \cos 2\beta' + \cos 2\beta'' = 2\,[1 - (\sin^2\beta' + \sin^2\beta'')]$$
$$\Psi = \sin 2\beta' + \sin 2\beta''$$
$$\Theta = \sin 2\beta' - \sin 2\beta''.$$

On peut interchanger les indices ′ et ″ dans Φ et dans Ψ, c'est-à-dire changer le signe de k_1, sans que ces fonctions changent ; elles sont donc fonctions paires de k_1 ou de a_1 ; Θ en est fonction impaire.

On aura :

$$\Phi = 2\,\frac{1 - (a^2 - a^2_1)^2}{[1 + (a^2 - a^2_1)]^2 + 4\,a^2_1}$$
$$\Psi = 4\,a\,\frac{1 + (a^2 - a^2_1)}{[1 + (a^2 - a^2_1)]^2 + 4\,a^2_1}$$
$$\Theta = -4\,a_1\,\frac{1 - (a^2 - a^2_1)}{[1 + (a^2 - a^2_1)]^2 + 4\,a^2_1}$$

et on en déduira les relations suivantes :

1°) $$\frac{\Phi}{\Psi} = \frac{1}{2}\,\frac{1 - (a^2 - a^2_1)}{a}$$

d'où

$$a^2_1 = -1 + a^2 + 2a\,\frac{\Phi}{\Psi}.$$

2°) $$\frac{\Theta}{\Phi} = -2\,a_1\,\frac{1}{1 + (a^2 - a^2_1)}$$

3°) $$\frac{\Theta}{\Psi} = -\frac{a_1}{a}\,\frac{1 - (a^2 - a^2_1)}{1 + (a^2 - a^2_1)}$$

4°) $$\Psi + \Theta = 4\,(a - a_1)\,\frac{1 + (a + a_1)^2}{[1 + (a^2 - a_1^2)]^2 + 4\,a_1^2}$$

$$\Psi - \Theta = 4\,(a + a_1)\,\frac{1 - (a - a_1)^2}{[1 + (a^2 - a_1^2)]^2 + 4a_1^2}$$

d'où

$$a\,\Psi - a_1\,\Theta = \frac{1}{2}\left\{(\Psi + \Theta)\,(a - a_1) + (\Psi - \Theta)\,(a + a_1)\right\}$$
$$= 4\,\frac{a^2 + a_1^2 + (a^2 - a_1^2)^2}{[1 + (a^2 - a_1^2)]^2 + 4\,a_1^2}$$
$$= 2 - \Phi.$$

Digitized by Google

4. *Courant dans le rotor en fonction du courant dans le stator.* — Le courant i_0 de la phase O du rotor devient, en y introduisant les valeurs de k' et de k'' trouvées au n° 2 :

$$i_0 = I' \sin (k - k_1)\, t + I'' \sin (k + k_1)\, t$$

Le flux d'induction embrassé par cette phase du rotor est :

$$\mathcal{L}_1 i_0 + \mu_0 i = \mathcal{L}_1 [I' \sin (k - k_1)\, t + I'' \sin (k + k_1)\, t]$$
$$+ \frac{\mathfrak{M} I}{2} \left\{ \cos [(k - k_1)\, t + \alpha - \psi] - \cos [(k + k_1)\, t + \alpha + \psi] \right.$$

et la force électromotrice produite par la variation de ce flux en fonction de temps sera

$$- \mathcal{L}_1 (k - k_1)\, I' \cos (k - k_1)\, t - \mathcal{L}_1 (k + k_1)\, I'' \cos (k + k_1)\, t$$
$$+ \frac{\mathfrak{M} I}{2} (k - k_1) \sin [(k - k_1)\, t + \alpha - \psi]$$
$$- \frac{\mathfrak{M} I}{2} (k + k_1) \sin [(k + k_1)\, t + \alpha + \psi]$$

Or, elle doit être égale à $r_1 i_0$.

En identifiant ces deux volumes, on obtient :

$$I' = \frac{\mathfrak{M} I}{2 \mathcal{L}_1} \sin \beta' \qquad I'' = \frac{\mathfrak{M} I}{2 \mathcal{L}_1} \sin \beta''$$
$$\alpha - \psi = \beta' \qquad \alpha + \psi = \beta'' + \pi$$

d'où

$$\alpha = \frac{\beta'' + \beta'}{2} + \frac{\pi}{2} \qquad \psi = \frac{\beta'' - \beta'}{2} + \frac{\pi}{2}$$

et le courant dans la phase O du rotor devient

$$i_0 = \frac{\mathfrak{M} I}{2 \mathcal{L}_1} [\sin \beta' \sin (k - k_1)\, t + \sin \beta'' \sin (k + k_1)\, t]$$

5. *La puissance moyenne absorbée par le stator,* obtenue au n° 2, devient alors :

Digitized by Google

$$W = \frac{\gamma_1^2}{4} k \mathcal{L} I^2 \Psi$$

La force *contre* électromotrice du stator devient

$$e = k \mathcal{L} I \left\{ \cos(kt + \alpha)\left(1 - \gamma_1^2 + \frac{\gamma_1^2}{2}\Phi\right) + \sin(kt + \alpha) \cdot \frac{\gamma_1^2}{2}\Psi \right\}$$

qui, égalée à la force électromotrice appliquée

$$u = U \sin\varphi \cdot \cos(kt + \alpha) + U \cos\varphi \cdot \sin(kt + \alpha)$$

fournit, en posant

$$\frac{U}{k\mathcal{L}} = A, \text{ qui a les dimensions d'un courant,}$$

les relations :

$$I\left[1 - \gamma_1^2 + \frac{\gamma_1^2}{2}\Phi\right] = A \sin\varphi$$

$$I\frac{\gamma_1^2}{2}\Psi = A \cos\varphi$$

d'où

$$I = \frac{A}{\sqrt{\left(1 - \gamma_1^2 + \frac{\gamma_1^2}{2}\Phi\right)^2 + \frac{\gamma_1^4}{4}\Phi^2}}$$

$$\operatorname{tang}\varphi = \frac{1 - \gamma_1^2 + \frac{\gamma_1^2}{2}\Theta}{\frac{\gamma_1^2}{2}\Theta}$$

$$= \frac{\frac{2}{\gamma_1^2} - 2 + \Phi}{\Psi} = 2\frac{1 - \gamma_1^2}{\gamma_1^2}\frac{1}{\Psi} + \frac{\Phi}{\Psi}$$

ou, d'après le 1°) du n° 3,

$$\operatorname{tang}\varphi = 2\frac{1 - \gamma_1^2}{2}\frac{1}{\Psi} + \frac{1}{2}\frac{1 - (a^2 - a_1^2)}{a}$$

I et φ sont, comme Φ et Ψ, des fonctions paires de a_1 ou de k_1.

Digitized by Google

Remarquons que I *n'est jamais nul*, car son dénominateur est toujours fini.

6. *Puissance mécanique développée sur le rotor.* — Cette puissance est, pour la phase O du rotor,

$$i\, i_0 \frac{d\mu_0}{dt}$$

$$= -\frac{1}{4} k_1 \mathfrak{M}\, \mathrm{I}\, \mathrm{I}' \left\{ \cos\left[2(k-k_1)t + \beta'\right] - \cos\beta' \right\}$$

$$+ \frac{1}{4} k_1 \mathfrak{M}\, \mathrm{I}\, \mathrm{I}'' \left\{ \cos\left[2(k+k_1)t + \beta''\right] - \cos\beta'' \right\}$$

Sa valeur moyenne dans le temps est, pour l'ensemble des n phases du rotor,

$$\mathrm{W}' = \frac{1}{4} k_1 \mathcal{L}\, \mathrm{I}^2 r_1^2\, \Theta$$

C'est une fonction paire de a_1 ou de k_1, car Θ en est une fonction impaire.

7. L'*effet Joule* moyen dans l'ensemble des n phases du rotor est

$$\mathrm{J} = \frac{1}{2} n \left(\mathrm{I}'^2 + \mathrm{I}''^2\right) r_1 = \frac{n\, \mathfrak{M}^2\, \mathrm{I}^2}{8\, \mathcal{L}_1} \left(\sin^2\beta' + \sin^2\beta''\right) r_1$$

$$= \frac{1}{4a} k\, \mathcal{L}\, \mathrm{I}^2 r_1^2 (2 - \Phi)$$

On a, au surplus,

$$\mathrm{W} - \mathrm{W}' = \frac{1}{4} r_1^2\, k\, \mathcal{L}\, \mathrm{I}^2 \left[\Psi = \frac{a_1}{a}\, \Theta\right] = \mathrm{J}$$

d'après le 4°) du n° 3

8. Le *couple moteur C* développé à la périphérie du rotor est

$$\mathrm{C} = \frac{\mathrm{W}'}{\omega_1} = p\, \frac{\mathrm{W}'}{k_1}$$

$$= p\, \frac{r_1^2}{4} \mathcal{L}\, \mathrm{I}^2\, \Theta$$

C'est une fonction paire de a_1 ou de k_1.

Digitized by Google

On a :

	$a_1 = 0$ démarrage	$a^2_1 = a^2 - 1$ couple nul	$a^2_1 = a^2$ synchronisme	$a^2_1 = a^2 + 1$ puissance électrique absorbée nulle	$a^2_1 = \infty$
Φ	$2\,\frac{1 - a^2}{1 + a^2}$	0	$\frac{2}{1 + 4a^2}$	0	-2
Ψ	$\frac{4a^2}{1 + a^2}$	$\frac{2}{a}$	$\frac{4a}{1 + 4a^2}$	0	0
Θ	0	0	$-\frac{4a_1}{1 + 4a^2}$	$-\frac{2}{\sqrt{1 + a^2}}$	0
I	$\frac{\sqrt{1 + a^2}}{\sqrt{1 + a^2 - 4a^2\eta^2(1 - \eta^2)}}\,A$	$\frac{a}{\sqrt{a^2(1 - \eta^2)^2 + \eta^4}}\,A$	$\frac{\sqrt{1 + 4a^2}}{\sqrt{1 + 4a^2(1 - \eta^2)^2}}\,A$	$\frac{1}{1 - \eta^2}\,A$	$\frac{1}{1 - 2\eta^2}\,A$
tang φ	$\frac{1 + a^2(1 - 2\eta^2)}{2a\eta^2}$	$\frac{a(1 - \eta^2)}{\eta^2}$	$\frac{1 + 4a^2(1 - \eta^2)}{2a\eta^2}$	∞	∞
W	$k\mathcal{L}\eta^2\,\frac{aA^2}{1 + a^2 - 4a^2\eta^2(1 - \eta^2)}$	$\frac{k\mathcal{L}\eta^2}{2}\,\frac{aA^2}{a^2(1 - \eta^2)^2 + \eta^4}$	$k\mathcal{L}\eta^2\,\frac{2aA^2}{1 + 4a^2(1 - \eta^2)^2}$	0	0
C	0	0	$-p\mathcal{L}\eta^2\,\frac{aA^2}{1 + 4a^2(1 - \eta^2)^2}$	$-\frac{p\mathcal{L}\eta^2}{2}\,\frac{A^2}{\sqrt{1 + a^2(1 - \eta^2)^2}}$	0
W'	0	0	$-k\mathcal{L}\eta^2\,\frac{aA^2}{1 + 4a^2(1 - \eta^2)^2}$	$-\frac{k\mathcal{L}\eta^2}{2}\,\frac{A^2}{a(1 - \eta^2)^2}$	$-k\mathcal{L}\eta^2\,\frac{A^2}{(1 - 2\eta^2)^2}$
J	$k\mathcal{L}\eta^2\,\frac{aA^2}{1 + a^2 - 4a^2\eta^2(1 - \eta^2)}$	$\frac{k\mathcal{L}\eta^2}{2}\,\frac{aA^2}{a^2(1 - \eta^2)^2 + \eta^4}$	$k\mathcal{L}\eta^2\,\frac{2aA^2}{1 + 4a^2(1 - \eta^2)^2}$	$\frac{k\mathcal{L}\eta^2}{2}\,\frac{A^2}{a(1 - \eta^2)^2}$	$k\mathcal{L}\eta^2\,\frac{A^2}{(1 - 2\eta^2)^2}$

Digitized by Google

9. *Valeurs remarquables.*

Au démarrage $a_1 = 0$.

Le couple est nul pour $a_1 = 0$ et pour $a_1^2 = a^2 - 1$, valeur très voisine de a^2. Pour $a_1^2 < a^2 - 1$ le couple a le signe de ω_1, c'est un couple moteur. Pour $a_1^2 > a^2 - 1$, c'est un couple résistant.

Le couple est nul pour $a_1^2 = \infty$. Entre ses zéros, il passe naturellement par des maximum ou des minimum.

Au synchronisme $a_1^2 = a^2$.

La puissance mécanique W′ est nulle pour $a_1 = 0$ et pour $a^2 = a^2 - 1$.

La puissance totale est nulle pour $a_1^2 = a^2 + 1$, c'est-à-dire un peu au delà du synchronisme ; cos φ est alors nul. Elle est positive pour $a_1^2 < a^2 + 1$,, la machine est alors réceptrice par rapport au réseau ; pour $a_1^2 > a^2 + 1$, elle est génératrice.

Entre les valeurs $a_1^2 = a^2 - 1$ et $a_1^2 = a^2 + 1$, le couple est résistant, et la machine fonctionne néanmoins en réceptrice, la somme de la puissance mécanique et de la puissance électrique, toutes deux positives, qui lui sont fournies, étant transformée en effet joule dans le rotor.

Le tableau de la page précédente donne quelques valeurs remarquables.

Remarque. — La recherche des maxima et minima du couple conduirait à des calculs compliqués.

§ 2. — Interprétation graphique.

10. — *Diagramme circulaire I φ.*

Eliminons la vitesse ω_1, c'est-à-dire a_1, entre les relations du n° 5

$$I\left[1 - \eta^2 + \frac{\eta^2}{2}\Phi\right] = A \sin\varphi$$

$$I\frac{\eta^2}{2}\Psi = A\cos\varphi$$

Digitized by Google

que l'on peut écrire

$$\Phi = \frac{2}{r_1^2}\left[\frac{A}{I}\sin\varphi - (1 - r_1^2)\right]$$

$$\Psi = \frac{2}{r_1^2}\frac{A}{I}\cos\varphi$$

Mais on a obtenu au n° 3

$$\Psi = 4a\frac{1 + (a - a_1^2)}{[1 + (a^2 + a_1^2)]^2 - 4a^2a_1^2}$$

$$a_1^2 = -1 + a^2 + 2a\frac{\Phi}{\Psi}$$

Eliminons a_1 entre ces deux dernières relations ; il vient

$$\Phi^2 + \Psi^2 = \frac{2}{a}\Psi - 2\Phi$$

Il suffit d'y substituer les valeurs de Φ et de Ψ en I et φ pour procéder à l'élimination visée ; on obtient :

$$I^2(1 - r_1^2)(1 - 2r_1^2) - A\,I\sin\varphi\,.\,[(1 - r_1^2) + (1 - 2r_1^2)]$$
$$- \frac{r_1^2}{a}A\,I\cos\varphi + A^2 = 0$$

Identifions cette équation avec la suivante, qui représente (fig. 1) une circonférence du rayon R, de vecteur I φ, dont le centre C est distant de l'origine O de δ, le vecteur du centre étant incliné de

$$\left(\frac{\pi}{2} - \theta\right)$$

sur l'axe polaire O U :

$$R^2 = I^2 + \delta^2 - 2\,I\,\delta\sin(\varphi + \theta)$$

ou

$$I^2 - 2\,I\sin\varphi.\,\delta\cos\theta - 2\,I\cos\varphi.\,\delta\sin\theta + \delta^2 - R^2 = 0$$

On obtient :

Digitized by Google

$$\frac{1}{(1-\eta_1^2)(1-2\eta_1^2)} = \frac{2\delta\cos\theta}{A[(1-\eta_1^2)+(1-2\eta_1^2)]}$$

$$= \frac{2\delta\sin\theta}{\frac{\eta_1^2}{a}A} = \frac{\delta^2 - R^2}{A^2}$$

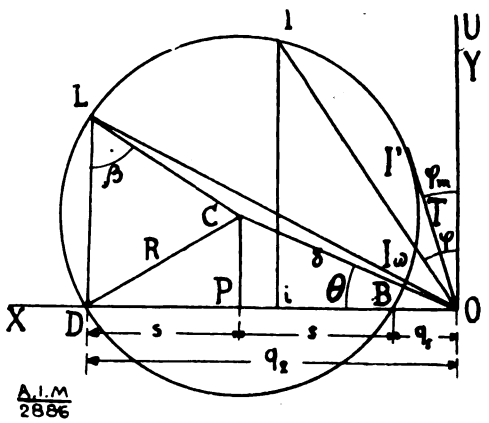


Fig. 1.

d'où, en prenant l'axe polaire U comme axe des Y, et l'axe correspondant à $\varphi = \pi/2$ comme axe des X :

$$\delta\sin\theta = \frac{\frac{\eta_1^2}{a}}{2(1-\eta_1^2)(1-2\eta_1^2)}A = Y_c \text{ ordonnée du centre}$$

$$\delta\cos\theta = \frac{(1-\eta_1^2)+(1-2\eta_1^2)}{2(1-\eta_1^2)(1-2\eta_1^2)}A = X_c \text{ abscisse du centre}$$

$$\operatorname{tang}\theta = \frac{\eta_1^2}{a[(1-\eta_1^2)+(1-2\eta_1^2)]}$$

$$\delta^2 = \frac{\frac{\eta_1^4}{a^2}+[(1-\eta_1^2)+(1-2\eta_1^2)]^2}{4(1-\eta_1^2)^2(1-2\eta_1^2)^2}A^2$$

$$\delta^2 - R^2 = \frac{A^2}{(1-\eta_1^2)(1-2\eta_1^2)} = T^2\,;$$

Digitized by Google

T est la longueur de la tangente OI' par l'origine.

$$R = \frac{r_1^2}{2(1 - r_1^2)(1 - 2r_1^2)} \frac{A}{\sin \beta}$$

L'axe des X coupe la circonférence en deux points B et D dont les abcisses sont :

$$q_1 = \frac{A}{1 - r_1^2} \qquad q^2 = \frac{A}{1 - 2r_1^2}$$

On aura

$$\frac{q^2 - q_1}{2} = s = \frac{r_1^2}{2(1 - r_1^2)(1 - 2r_1^2)} A$$

Ainsi, *l'extrémité du vecteur I φ décrit une circonférence, coupant l'axe des X en deux points B et D indépendants de la résistance r, du rotor par phase. Quand r, varie, le centre se meut sur une parallele P C à l'axe O Y et son ordonnée est proportionnelle à 1/a, donc r_1.*

Le point B correspond à W = O (passage de la marche en réceptrice à la marche en génératrice) ; le point D, à $\alpha^2_1 = \infty$ c'est-à-dire à une vitesse infinie dans l'un ou l'autre sens.

11. *Autres relations remarquables.*

1° tang D C P $= \frac{s}{\delta \sin \theta} = a$; donc D C P $= \beta$. La circonférence est capable de l'angle β par rapport à la corde D B ;

2° Cos φ est maximum en I¹, tel que tang $(\theta + \varphi_{min}) = T/R$;

3° On a, en éliminant r_1^2 entre q_1 q_2 :

$$A = \frac{T^2}{2q_2 - q_1}$$

A est donc une troisième proportionnelle, aisée à construire, entre T et $(2q_2 - q_1)$.

4° Traçons O L ; on a :

$$\text{tang Y O L} = \text{tang O L D} = \frac{q_2}{2R \cos \beta} = \frac{a(1 - r_1^2)}{r_1^2}.$$

Digitized by Google

On voit que O L coupe la circonférence *au point I_{co} correspondant au couple nul.* (Voir n° 9) ; on a en effet :

$$O\,I_{co}.\ O\,L = q_1\,q_2$$

d'où

$$O\,I_{co} = \frac{a\,A}{\sqrt{a^2(1-\eta_1^2)+\eta_1^4}}$$

L'angle $B\,I_{co}\,O$ est du reste égal à $O\,D\,L = \pi/2$.

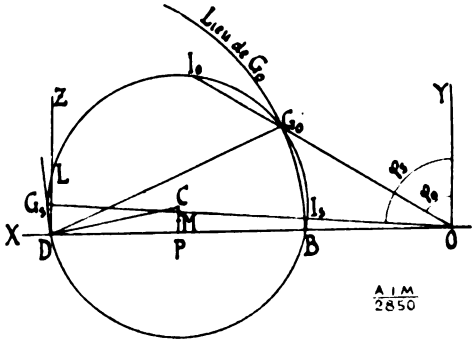


Fig. 2.

5° Traçons (fig. 2) $D\,G_0$ symétrique de $D\,B$ par rapport au diamètre $D\,C$; on aura

$$G_0\,DB = 2\left(\frac{\pi}{2} - \beta\right).$$

Joignons $O\,G_0\,I_0$ et soit $Y\,O\,G_0 = \varphi_0$. L'angle $D\,G_0\,O$ vaudra $(2\,\beta + \varphi_0 - \pi/2)$; et l'on a dans le triangle $G_0\,D\,O$:

$$\frac{\cos\varphi_0}{\cos(2\,\beta+\varphi_0)} = -\frac{2\,s}{q_2} = -\frac{\eta_1^2}{1-\eta_1^2}$$

d'où

$$\operatorname{tang}\varphi_0 = \frac{1 + a^2(1-2\,\eta_1^2)}{2\,a\,\eta_1^2}$$

Les projections de $O\,G_0$ sur les axes X et Y sont :

Digitized by Google

$$q_2 + 2s\cos 2\beta = q_2\left[1 + \frac{r_1^2}{1 - r_1^2}\,\frac{1 - a^2}{1 + a^2}\right]$$

$$2s\sin 2\beta = q_2\,\frac{r_1^2}{1 - r_1^2}\,\frac{2a}{1 + a^2}$$

d'où

$$OG_0 = \frac{q^2}{(1 - r_1^2)\sqrt{1 + a^2}}\sqrt{1 + a^2 - 4a^2 r_1^2(1 - r_1^2)}$$

et par conséquent

$$OI_0 = \frac{q_1 q_2}{OG_0} = \frac{A\sqrt{1 + a^2}}{\sqrt{1 + a^2 - 4a^2 r_1^2(1 - r_1^2)}}$$

On voit donc, d'après le n° 9, que *le point I_0 correspond au démarrage.*

5° Traçons la droite DG_s faisant avec DL l'angle SDG_s dont la tangente est

$$\frac{1}{2a} = \frac{1}{2}\operatorname{cotang}\beta.$$

On obtiendra donc (fig. 2) G_s en prenant le milieu M de CP et traçant DG_s perpendiculaire à DM.

Nous verrons bientôt que OG_s coupe la circonférence en un point I_s correspondant au *synchronisme* (voir n° 13).

6° Ainsi, *quand la vitesse ω_1 passe de $-\infty$ à O et de O à $-\infty$, l'extrémité du vecteur I part du point D et, en parcourant la circonférence dans le sens anti-horlogique, arrive au point I_0 ; puis il repart du point I_0, et, cette fois dans le sens horlogique, revient au point D.* La région DI_0 de la circonférence, considérée dans le sens horlogique, est inaccessible.

12. — *La puissance électrique W absorbée*, proportionnelle à $I\cos\varphi$, est représentée à une certaine échelle (fig. 1) par l'ordonnée Ii de la circonférence ; l'échelle est indépendante de r_1.

Digitized by Google

La machine fonctionne en réceptrice dans la région $I_0 B$; en génératrice dans la région BD (fig. 2).

13. — *Glissement.* — On a, d'après les relations du n° 10 :

$$\frac{\Phi}{\psi^{\cdot}} = \frac{\frac{A \sin \varphi}{I} - (1 - \eta_1^2)}{\frac{A \cos \varphi}{I}} = \frac{q_1 \sin \varphi - I}{q_1 \cos \varphi}$$

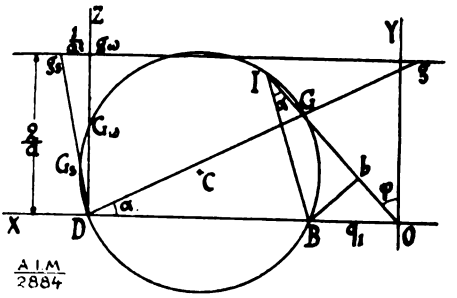


Fig. 3.

Projetons (fig. 3) B en b sur OI ; on voit que

$$-\frac{\Phi}{\psi^{\cdot}} = \frac{bI}{Bb} = \text{cotang } OIB = \text{cotang } GDB$$
$$= \text{tang } ZDG$$

Mais on a (n° 3, 1°)

$$-\frac{\Phi}{\psi^{\cdot}} = \frac{a^2 - a_1^2 - 1}{2a}$$

Donc

$$\frac{a^2 - a_1^2}{a^2} = \frac{1}{a^2} + \frac{2}{a} \text{tang } ZDG$$

On obtiendra facilement la valeur de $\frac{a^2 - a_1^2}{a^2}$ par la construction suivante : portons sur DZ à une échelle quelconque $Dg_{co} = 2/a$; traçons par g_{co} une parallèle à

Digitized by Google

DO ; portons-y $g_{co} g_s = 1/a^2$; la longueur gg_s représentera à l'échelle choisie la valeur de $\frac{a^2 - a_1^2}{a^2}$, d'où l'on déduira a_1^2 et le glissement $(a - a_1)$, pour une position déterminée OI du vecteur I. Inversement, le glissement étant donné, on en déduira la position correspondant du point I.

D'ailleurs,

$$\text{tang } g_{co} \text{ D } g_s = \frac{1}{2a} = \frac{1}{2} \text{ cotang } \beta.$$

Au *synchronisme*, $a_1 = a^2$; le point g vient en g_s, et le point G en G_s, tel que tang $ZDG_s = \frac{1}{2}$ cotang β, ce qui qui démontre la propriété énoncée au n° 11, 5°.

Au *démarrage*, $a_1 = o$; g vient en g_o et l'on a :

$$\text{tang } g_{co} \text{ D} g_o = \frac{a^2 - 1}{2a} = \text{tang}\left(2\beta - \frac{\pi}{2}\right)$$

$$\text{OD} g_o = \pi - 2\beta$$

ce qui confirme la construction donnée au n° 11, 4°.

Quand le *couple est nul*, $a_1^2 = a^2 - 1$; g vient en g_{co} tel que tang g_{co} D$g_{co} = o$, ce qui confirme la construction donnée au n° 11, 4°.

14. *Effet joule dans le rotor.* — On a obtenu au n° 7 :

$$J = \frac{1}{4a} k \mathcal{L} I^2 r_1^2 (2 - \Phi)$$

et au n° 5

$$- A \sin \varphi + I = \frac{r_1^2}{2} (2 - \Phi) I$$

Il en résulte

$$J = \frac{1}{2a} k \mathcal{L} I (I - A \sin \varphi)$$

La puissance totale W = UI cos φ a été représentée, à

Digitized by Google

une certaine échelle (voir n° 12) par I cos φ. A la même échelle, l'effet joule sera représenté par

$$y = \frac{J}{U} = \frac{1}{2aA}(I^2 - Ax)$$

en posant

$$x = I \sin \varphi$$

Mais l'extrémité du vecteur I, projeté en $x = I \sin \varphi$ et en $y = I \cos \varphi = \pm \sqrt{I^2 - x^2}$, selon que cos φ est $\pm$, est sur la circonférence

$$R^2 = I^2 + \delta^2 - 2\delta \cos \theta . x \mp 2\delta \sin \theta . \sqrt{I^2 - x^2} = o$$

ou

$$I^2 - x^2 \mp 2\delta \sin \theta \sqrt{I^2 - x^2}$$
$$+ (\delta^2 - R^2 - 2\delta \cos \theta . x + x^2) = o$$

d'où

$$\sqrt{I^2 - x^2} = \pm \delta \sin \theta \pm \sqrt{R^2 - (\delta \cos \theta - x)^2}$$

$\delta \sin \theta$ étant affecté du signe $\pm$ selon que cos φ est $\pm$; le signe du radical étant indifférent ; d'où encore

$$I^2 = R^2 - \delta^2 \cos 2\theta + 2\delta \cos \theta . x$$
$$\pm \sqrt{R^2 - (\delta \cos \theta - x)^2} . 2\delta \sin \theta$$

Eliminons I^2 entre cette équation et l'équation ci-dessus $y = J/U$. Il vient :

$$y = \frac{1}{2aA}\Big[R^2 - \delta^2 \cos 2\theta + (2\delta \cos \theta - A)x$$
$$\pm 2\delta \sin \theta \sqrt{R^2 - (\delta \cos \theta - x)^2}\Big]$$

équation qui donne l'effet joule en fonction de $x = I \sin \varphi$. Elle représente une *ellipse*, comprise entre les valeurs extrêmes $x = \delta \cos \theta \pm R$, c'est à dire entre les deux tan-

Digitized by Google

gentes menées à la circonférence parallèlement à OY ; le centre de l'ellipse est sur la droite PC (fig. 1).

La droite

$$y + \frac{1}{2aA}\left[R^2 - \delta^2 \cos 2\theta + (2\delta \cos \theta - A)\, x\right]$$

est un diamètre de l'ellipse ; ce diamètre coupe l'axe des y en

$$y = \frac{1}{2aA}(R^2 - \delta^2 \cos 2\theta),$$

et la verticale PC en

$$y = \frac{1}{2aA}\left[R^2 + \delta^2 - A\delta \cos \theta\right];$$

le diamètre conjugué, vertical, est

$$\frac{R\delta \sin \theta}{aA}.$$

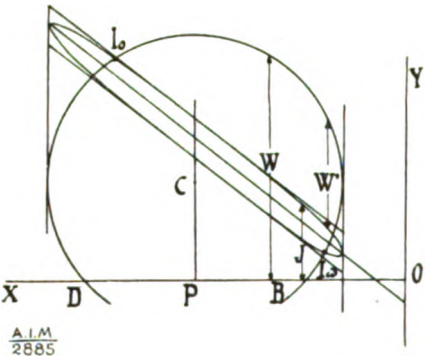


Fig. 4.

Il est généralement très petit par rapport au diamètre 2 R de la circonférence, c'est-à-dire que l'ellipse se réduit presqu'au diamètre oblique dont il vient d'être parlé.

Digitized by Google

Au surplus, si (fig. 4) nous agrandissons les ordonnées de l'ellipse dans le rapport

$$\frac{a\,A}{\delta \sin \theta},$$

les deux diamètres conjugués deviennent égaux à 2 R ; on a, pour les ordonnées y' de la nouvelle ellipse

$$y' = \left[R^2 - \delta^2 \cos 2\theta + (2\delta \cos \theta - A)\,x \pm \ldots\ldots\right] \frac{1}{2\delta \sin \theta}$$

En la rapportant à un axe des x représenté par

$$y = \frac{-1}{2\delta \sin \theta}\left[R^2 - \delta^2 \cos 2\theta + (2\delta \cos \theta - A)\,x\right]$$

son équation devient :

$$y'' = \pm \sqrt{R^2 - (\delta \cos \theta - x)^2}$$

qui représente une circonférence.

On pourra donc aisément, par ce procédé ou autrement, transformer l'ellipse représentant l'effet joule à l'échelle des puissances W.

Naturellement, cette ellipse doit couper la circonférence ($I\,\varphi$) aux points I_0 et I_{co}.

Remarque. — A chaque valeur de x correspondent deux valeurs de I, l'une, plus grande, relative à la marche en réceptrice (cos φ +) ; l'autre, plus petite, relative à la marche en génératrice (cos φ —) ; l'arc supérieur et l'arc inférieur de l'ellipse correspondent donc respectivement à ces deux fonctionnements.

15. La *puissance mécanique* W' est représentée à l'échelle des W par la différence des ordonnées de la circonférence ($I\,\varphi$) et de l'ellipse d'effet joule. La fig. 5 montre la séparation, par le point de couple nul I_{co}, des régions où W' est + ou —.

Digitized by Google

W′ serait représenté en fonction de $x = I \sin \varphi$ par une ellipse, mais son équation et sa construction sont compliquées. On peut plus aisément obtenir W′ par la différence W — J.

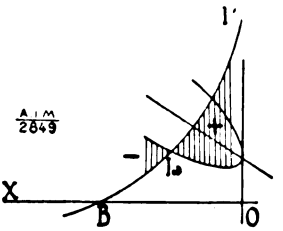


Fig. 5.

16. Je n'ai pas trouvé, pour le *couple C* en fonction de $x = I \sin \varphi$, une représentation simple. Mais on peut aisément le déduire, par tables, de W′ (n° 15) et de ω_1, donc de a_1 (n° 13). On a, en effet (n° 8) :

$$C = \frac{W'}{\omega_1} = \frac{a_1 r_1}{p \mathcal{L}_1} W'$$

§ 3. — Démarrage.

17. En modifiant la résistance de r_1 du rotor, on ne change que $a = K \mathcal{L}_1 / r_1$ et non r_1^2. Donc les points B et D de la circonférence (I φ) restent fixes ; l'ordonnée C P du centre augmente proportionnellement à r_1 ; son rayon R grandit.

1°) *Lieu géométrique de* G_0 (fig. 2). La distance $D G_0 = 2s$ est indépendante de r_1 ; le point G_0 décrit donc, quand r_1 augmente, une circonférence autour du point D comme centre et ayant D B comme rayon.

2°) *Lieu de* I_0 (fig. 6). L'angle $D I_0 B = \beta$ (n° 11, 1°) ; l'angle $O D G_0$ = angle $B I_0 O = \pi - 2\beta$ (n° 13) ; traçons la bissectrice $I_0 D'$ de ce dernier angle ; l'angle $D I_0 D'$ sera

Digitized by Google

donc droit, c'est-à-dire que D I_0 est la bissectrice de l'angle extérieur du triangle O I_0 B ; les points O D′ B D constituent par conséquent une division harmonique, et les points O B D étant fixes, le point D′ l'est. Le lieu de I_0 est la circonférence ayant pour diamètre D D′. On voit aisément que O D′ = A.

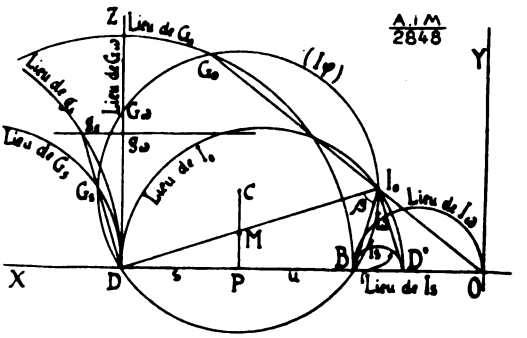


Fig. 6.

Ainsi, *les seuls points du plan accessibles au point I* sont ceux qui, au-dessus de O X, sont compris à l'intérieur du demi-cercle de diamètre D D′ et, au dessous de OX, ceux qui sont compris à l'intérieur du demi-cercle de diamètre D B. Il en résulte que *cos φ ne peut jamais devenir égal à l'unité.*

3°) le *lieu de* G_{co} est d'après n° 11, 4°, la ligne D z, et

3°) le *lieu de* I_{co} est d'après n° 11, 4°, la demi-circonférence décrite sur O B comme diamètre.

4°) le *lieu de* G_s est une circonférence de rayon s passant par D et dont le centre est sur D X à gauche de D. Prenons en effet D comme origine des axes rectangulaires D u et D z, soit C P $= 2g$; on a démontré que D G_s est perpendiculaire à D M (n° 11, 4°) ; elle a donc pour équation

$$\frac{z}{u} = -\frac{s}{g}$$

Digitized by Google

La circonférence (I φ) a pour équation :

$$z^2 - 4gz + u^2 - 2su = 0$$

Eliminons g entre ces deux équations ; il vient :

$$z^2 + u^2 + 2su = 0$$

qui est l'équation du lieu.

5°) Le *lieu de* I_s est aussi une circonférence, dont le centre est O X, car on a $O G_s \times O I_s = q_1 q_2 =$ constante. Elle coupe l'axe O X en deux points d'abscisses X égales à

$$\frac{q_1 q_2}{q_2} = q_1$$

et

$$\frac{q_1 q_2}{q_2 + 2s} = \frac{q_1 q_2}{2q_2 - q_1} = A ;$$

elle passe par B et par D'.

18. L'échelle des puissances n'est pas modifiée par le réglage de r_1.

19. Les glissements (fig. 3) sont donnés par

$$gg_s = \frac{a^2 - a_1^2}{a^2} ;$$

pour un même glissement relatif $\frac{a - a_1}{a}$, gg_s est indépendant de r_1 ; mais *l'origine* g_s *décrit, quand* r_1 *varie, une parabole d'axe* D X_1 de sommet D, et telle que

$$g_{co} g_s = \frac{1}{4} \left(g_{co} D\right)^2.$$

On graduera aisément D z en fonction de r_1 de façon à trouver le point g_{co} pour une valeur donnée de r_1 ou de $a = \frac{k \mathcal{L}_1}{r_1}$, car $Dg_{co} = \frac{2}{k \mathcal{L}_1} r_1$.

OSCAR COLARD.

Digitized by Google

621.316 **Notes relatives au calcul des réseaux électriques.** (1)

DEUXIÈME PARTIE.

Dans cette deuxième partie nous nous proposons d'étudier de plus près le problème du calcul des réseaux pour ce qui concerne la chute de tension maxima et le poids (ou volume) de cuivre.

I. — De la chute de tension.

Dans ce paragraphe, nous examinerons le problème suivant : *calculer les sections d'un réseau, étant données la chute de tension maxima, ainsi que la densité de courant maxima.*

Nous raisonnerons directement sur l'exemple résolu, page 433 et suivantes, pour lequel nous nous imposerons la densité maxima égale à l'unité, et la chute de tension maxima (de A à G) égale à 550. Cette valeur est calculée comme nous l'avons expliqué plus haut.

Nous donnerons trois solutions du problème que nous comparerons au point de vue du volume du cuivre.

Première solution. — Dans la solution trouvée, page 436, la chute de tension en G atteint 580 ; il suffit de multiplier toutes les sections par le rapport 580/550.

Remarquons que de cette façon aucune des densités n'atteint sa valeur maxima.

(1) Voir *Bulletin de l'A. I. M.*, t. XIII, 1913, p. 417 (fasc. 9.)

Digitized by Google

Le volume de cuivre vaudra :

$$94.960 \times \frac{580}{550} = 100700.$$

Deuxième solution. — On obtiendra généralement une solution plus favorable au point de vue du poids de cuivre en ajoutant au système des équations (1) (2) (3) des pages 434 et 435, une équation exprimant la condition de chute de tension maxima.

On obtient ainsi les équations suivantes :

Maille ABCDA : $120\Delta_1 + 134{,}75\Delta_2 + 179{,}55\,\Delta_3 - 353{,}7\,\Delta_4 = 0$ (1)
» CDGEC : $179{,}55\,\Delta_3 + 252\,\Delta'_5 - 200\,\Delta''_5 - 182\,\Delta_6 = 0$ (2)
» BCEHB : $134{,}75\,\Delta_2 + 182\,\Delta_6 - 260\,\Delta_7 = 0$ (3)
Chute de tension : $353{,}7\,\Delta_4 + 252\,\Delta'_5 = 550$ (4)

Δ'_5 et Δ''_5 se rapportant aux deux tronçons DG et EG pour lesquels nous avons admis des sections différentes.

L'examen de ces équations nous a conduit à prendre les valeurs suivantes pour les Δ et pour les sections :

$\Delta_4 = \Delta'_5 = \frac{550}{605{,}7} = 0{,}91$	$s_4 = 58^{mm^2},4$
	$s'_5 = 49^{mm^2}$
$\Delta''_5 = 1$	$s''_5 = 9^{mm^2},5$
$\Delta_6 = 1$	$s_6 = 26^{mm^2},5$
$\Delta_3 = \frac{182 - 27{,}5}{179{,}55} = 0{,}8$	$s_3 = 25^{mm^2},6$
$\Delta_2 = \frac{260 - 182}{134{,}75} = \frac{78}{134{,}75} = 0{,}58$	$s_2 = 88^{mm^2},8$
$\Delta_7 = 1$	$s_7 = 15^{mm^2}$
$\Delta_1 = \frac{321 - 154{,}5 - 78}{120} = 0{,}74$	$s_1 = 90^{mm^2}$

Volume du cuivre = 99,470.

Digitized by Google

Cette solution est donc un peu plus avantageuse que la précédente.

Troisième solution. — Cette solution, qui sera généralement la plus avantageuse, consiste à tenir compte de la condition de chute de tension dans le choix même des intensités de courants.

1. Ecrivons les équations de conditions sous leur forme générale :

Maille ABCDA : $L_1 \Delta_1 + L_2 \Delta_2 + L_3 \Delta_3 - L_4 \Delta_4 = 0$ (1)

» CDGEC : $L_3 \Delta_3 + L'_5 \Delta'_5 - 200 \Delta''_5 - L_6 \Delta_6 = 0$ (2)

» BCEHB : $L_2 \Delta_2 + L_6 \Delta_6 - L_7 \Delta_7 = 0$ (3)

Chute de tension : $L_4 \Delta_4 + L'_5 \Delta'_5 = 550$ (4)

Le chemin A D F G (voir fig. 6) étant le plus court de A jusque G, il est rationnel d'avoir pour les tronçons correspondants la densité de courant la plus grande possible.

Nous ferons donc :

$$\Delta_4 = \Delta'_5 = 1.$$

L'équation (4) se réduit alors à

$$L_4 + L'_5 = 550. \qquad (4')$$

L'équation (1) montre qu'il convient de prendre pour L_4 la plus grande valeur admissible et par suite, pour L'_5 et i'_5 la plus petite valeur possible ; comme la valeur la plus petite de i'_5 est 35, nous l'adopterons (1) d'où :

$$L'_5 = 400 - \frac{15 \times 200 + 20 \times 380}{35} = 400 - 303 = 187.$$

Il vient par (4') :

$$L_4 = 550 - 187 = 363$$

(1) Si l'on choisissait i'_5 inférieur à 35, le point de plus grande chute de tension ne serait plus G.

Digitized by Google

D'où :

$$i'_4 = \frac{16 \times 120 + 10 \times 320}{450 - 363} = \frac{5120}{87} = 58^{A},6$$

Les valeurs précédentes de i'_5 et de i'_4 sont indiquées sur la figure 8.

Il reste à déterminer les courants du circuit fermé BCFHB ; l'application de la solution par la densité constante nous fournit les valeurs inscrites sur la figure 8.

2. Par suite :

$$L_1 = 120$$

$$L_2 = 140 - \frac{3 \times 90}{45,9} = 134,1$$

$$L_3 = 200 - \frac{450}{6,9} = 134,8$$

$$L_4 = 363$$

$$L'_5 = 187$$

$$L''_5 = 200$$

$$L_6 = 270 - \frac{10 \times 100 + 7 \times 190}{36} = 205,3$$

$$L_7 = 790 - \frac{15 \times 530}{15} = 260$$

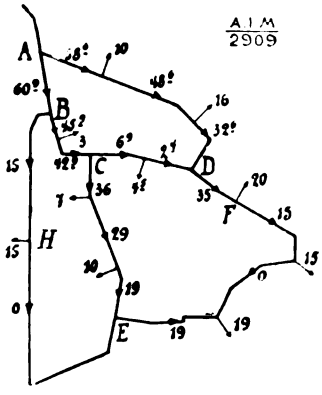


Fig. 8.

Digitized by Google

3. Les équations (1), (2), (3), s'écrivent :

$$120\,\Delta_1 + 134{,}1\,\Delta_2 + 134{,}8\,\Delta_3 - 363 = 0$$
$$134{,}8\,\Delta_3 + 187 - 200\,\Delta''_5 - 205{,}3\,\Delta_6 = 0$$
$$134{,}1\,\Delta_2 + 205{,}3\,\Delta_6 - 260\,\Delta_7 = 0$$

4. En raisonnant, comme nous l'avons fait précédemment, nous sommes conduits à prendre pour Δ_7, Δ_3, et Δ_1 la valeur maxima, c'est-à-dire l'unité.

5. Rapprochant ces valeurs de celles de Δ_4 et Δ'_5 déjà trouvées, (page 466) il vient :

$\Delta_4 = 1$	$s_4 = 58^{mm^2},6$
$\Delta'_5 = 1$	$s'_5 = 35$
$\Delta_7 = 1$	$s_7 = 15$
$\Delta_3 = 1$	$s_3 = 6{,}9$
$\Delta_1 = 1$	$s_1 = 60{,}9$
$\Delta_2 = \frac{108{,}2}{134{,}1} = 0{,}81$	$s_2 = 52$
$\Delta_6 = \frac{260 - 108{,}2}{205{,}3} = 0{,}74$	$s_6 = 48{,}7$
$\Delta''_5 = \frac{321{,}8 - 151{,}8}{200} = 0{,}85$	$s''_5 = 22{,}35$

Volume du cuivre : 89,000 (*).

Ce nombre montre l'avantage de la troisième solution.

2. — Du poids de cuivre.

Dans le présent paragraphe, nous avons en vue la résolution du problème suivant :

Etant donnée la valeur de la densité de courant maxima admissible dans un réseau, déterminer les sections des diffé-

(*) Détail $120 \times 60{,}9 + 140 \times 52 + 200 \times 6{,}9 + 450 \times 58{,}6 + 490 \times 35 + 200 \times 22{,}35 + 270 \times 48{,}7 + 790 \times 15 = 7{,}300 + 7{,}300 + 1{,}380 + 26{,}400 + 13{,}200 + 11{,}850 = 89{,}000$.

Digitized by Google

rents tronçons de telle façon que le poids (ou volume) du cuivre soit minima.

Sous cette forme, le problème est très difficile à résoudre en toute rigueur. Mais nous estimons logiquement, et les exemples résolus ci-après vérifient cette assertion, que la solution cherchée est très voisine de celle pour laquelle toutes les densités maxima Δ des différents tronçons sont égales à la densité limite.

Dans ce qui suit, nous nous proposons d'examiner les moyens de trouver cette dernière solution.

Procédé mathématique.

Admettons, comme nous l'avons fait précédemment, que les tronçons joignant deux nœuds du réseau et ceux joignant un nœud à un centre d'alimentation, aient une section constante, soit m le nombre de ces tronçons et q le nombre des nœuds.

L'application de la première loi de Kirchoff fournit $(m - q)$ équations distinctes de la forme :

$$L_1 \Delta_1 + L_2 \Delta_2 + \ldots\ldots L_s \Delta_s = o$$

en posant la condition que nous voulons réaliser entre ces m densité Δ, savoir :

$$\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 \ldots\ldots = \Delta_m$$

nous obtiendrons $m - q$ équations de la forme :

$$L_1 + L_2 + \ldots\ldots + L_s = o \qquad (1)$$

entre les m inconnues : L_1, $L_2 \ldots\ldots L_m$.

Il reste à établir q équations entre ces inconnues, équations que nous pourrons déduire de l'application de la seconde loi de Kirchoff, et qui seront de la forme :

$$\Sigma i = o.$$

Digitized by Google

Les valeurs des courants i aboutissant aux différents nœuds peuvent être exprimées en fonction des valeurs des expressions L. Pour cela, considérons un tronçon quelconque A B (fig. 2), dont nous nous proposons de déterminer les valeurs des courants extrêmes i' et i'' en fonction de L, le courant i' étant le plus grand en valeur absolue. Il vient, d'après les définitions admises page 423

$$L = \lambda - \frac{\Sigma \alpha l}{i'}$$

d'où

$$i' = \frac{\Sigma \alpha l}{\lambda - L}$$

et

$$i'' = i' - \Sigma \alpha.$$

La seconde loi de Kirchoff donnera donc, en chacun des q nœuds du réseau, une équation de la forme :

$$\frac{\Sigma \alpha_1 l_1}{\lambda_1 - L_1} \pm \frac{\Sigma \alpha_2 l_2}{\lambda_2 - L_2} \pm \ldots\ldots \pm \frac{\Sigma \alpha_r l_r}{\lambda_r - L_r} = \Sigma \alpha \qquad (2)$$

Le système des équations (1) et (2) résout complètement la question ; mais les équations (2) étant d'un degré supérieur au premier, leur résolution n'est pas pratique.

Procédé par approximations successives.

Etant donnée une solution d'un réseau obtenue par un procédé quelconque ; pour certains tronçons, les valeurs L seront beaucoup plus rapprochées des valeurs correspondantes de la *solution cherchée,* que pour d'autres tronçons. Si nous pouvons distinguer quelques-unes de ces valeurs L voisines de celles de la solution cherchée, elles pourront constituer le point de départ d'une nouvelle solution du réseau plus parfaite que la précédente et ainsi

Digitized by Google

de suite. De là résulte une résolution par *approximations successives* du problème proposé.

Le point délicat consiste à reconnaître les valeurs L qui varieront le moins. D'une façon générale, la valeur relative de la différentielle des L est une indication utile.

Comme

$$L = l - \frac{\Sigma \alpha l}{i}$$

la différentielle relative vaut donc :

$$\frac{dL}{L} = \frac{\Sigma \alpha l}{L} \cdot \frac{di}{i^2} = \frac{\Sigma \alpha l}{li - \Sigma \alpha l} \cdot \frac{di}{i}.$$

Cette formule montre que généralement il conviendra de choisir les tronçons chargés (i grand, di petit) débitant peu de courant (α petit).

Ceux aboutissant à des centres d'alimentation sont souvent dans ce cas.

Si q est le nombre des nœuds du réseau, nous chercherons les q valeurs de L les moins variables d'une première solution du réseau, et nous les introduirons dans les $m - q$ équations (1) de la page 469. Elles permettront de déterminer les valeurs L des $m - q$ tronçons restants, ces valeurs seront celles admises pour la seconde solution. On en déduira les valeurs des courants i' correspondants :

$$i' = \frac{\Sigma \alpha l}{\lambda - L}$$

lesquelles permettront de déterminer sur la figure, par l'application de la seconde loi de Kirchoff, les intensités dans tous les tronçons. De ces valeurs résulte la seconde solution.

Si celle-ci ne paraît pas suffisamment parfaite, on pourra utiliser ses résultats comme on l'a fait pour la première et ainsi de suite.

Digitized by Google

Mais il sera généralement préférable, pour la troisième solution par exemple, de choisir pour les valeurs L initiales, non pas celles de la deuxième solution, mais une valeur comprise entre celles de la première et de la deuxième, par exemple leur moyenne arithmétique.

Exemples. — I. Reprenons l'application de la page 425 et prenons comme première approximation, les valeurs des courants trouvées (fig. 3), c'est-à-dire les valeurs obtenues par simple intuition.

La première loi de Kirchoff permet d'écrire :

Circuit III II I : $\Delta_1 L_1 - \Delta_2 L_2 = o$,
Circuit III IV V : $\Delta_4 L_4 - \Delta_5 L_5 = o$,
Circuit I II IV V : $\Delta_2 L_2 + \Delta_3 L_3 - \Delta_5 L_5 = o$;

en posant :

$$\Delta_1 = \Delta_2 = \Delta_3 = \Delta_4 = \Delta_5,$$

on a :

$$\left.\begin{array}{l} L_1 = L_2 \\ L_4 = L_5 \\ L_2 + L_3 = L_5 \end{array}\right\} \qquad (1')$$

Comme le circuit comprend cinq tronçons et qu'il y a deux nœuds ($m = 5$, $q = 2$), il y a lieu de choisir les valeurs de L pour deux tronçons ; d'après ce que nous avons expliqué, les deux tronçons qui conviennent le mieux sont les tronçons I II et IV V ; ils donnent :

Tronçon I II : $L'_2 = 20 - \frac{10 \times 8}{19} = 15,8$

Tronçon IV V : $L'_5 = 35 - \frac{10 \times 20}{15} = 21,7$

Ces valeurs, portées dans les équations (1') donnent :

$$L_1 = 15,8 \qquad L_4 = 21,7$$
$$L_3 = L_5 - L_2 = 21,7 - 15,8 = 5,9 ;$$

Digitized by Google

D'où :

$$i'_1 = \frac{8 \times 25 + 10 \times 70}{95 - 15,8} = \frac{900}{79,2} = 11,4$$

$$i'_4 = \frac{10 \times 35 + 10 \times 60}{80 - 21,7} = \frac{950}{58,3} = 16,3$$

$$i'_3 = \frac{7 \times 20}{30 - 5,9} = \frac{140}{24,1} = 5,8$$

En portant ces valeurs sur la figure 9, on trouve :

$$i_2 = 20,4 \qquad \text{et} \qquad i_5 = 14,9$$

et par suite :

$$L_2 = 20 - \frac{80}{20,4} = 16,1$$

$$L_5 = 35 - \frac{200}{14,9} = 21,6 \qquad \text{(voir fig. 9)}$$

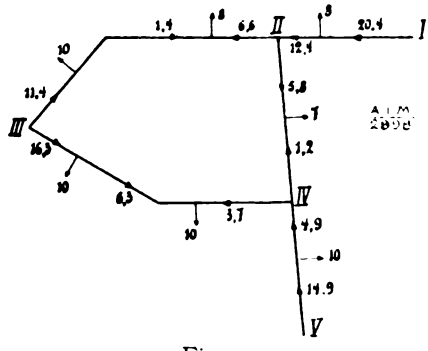


Fig. 9.

Avec ces valeurs L, on aura les équations (1) suivantes :

Circuit III II I : $15,8\,\Delta_1 - 16,1\,\Delta_2 = 0$

Circuit III II IV : $21,7\,\Delta_4 - 21,6\,\Delta_5 = 0$

Circuit III IV V : $16,1\,\Delta_2 + 5,9\,\Delta_3 - 21,6\,\Delta_5 = 0$

Digitized by Google

D'où :

$$\Delta_1 = 1 \qquad s_1 = 11^{mm^2},4$$

$$\Delta_2 = \frac{15,8}{16,1} = 0,98 \qquad s_2 = 20,8$$

$$\Delta_3 = 1 \qquad s_3 = 14,7$$

$$\Delta_4 = \frac{21,6}{21,7} = 0,99 \qquad s_4 = 16,4$$

$$\Delta_3 = \frac{21,6 - 15,8}{5,9} = 0,985 \qquad s_3 = 5,9$$

Il ne faut pas se dissimuler que la grande perfection de ces résultats au point de vue des valeurs de Δ est due en grande part au hasard ; ainsi, si nous avions admis comme première approximation la solution de la figure 5, les résultats eussent été moins bons.

Comparons la solution trouvée aux précédentes ; nous avons trouvé :

Solution . . . :	fig. 3	fig. 5	fig. 9
Volume du cuivre :	4484	3694	3500
Chute de tension maxima. . . :	III C : 29,4	III A : 30,18	III A ; 30,53

La dernière solution est la meilleure.

II. En opérant par approximations successives, nous avons trouvé pour l'exemple de la figure 6, les valeurs L suivantes : (*)

Tronçons AB : $L_1 = 120 \qquad i' = 49,8$

» BC : $L_2 = 140 - \frac{270}{33,2} = 131,9$

(*) Nous donnons les formules de résolution des valeurs L qui contiennent les valeurs des courants i' ; de celles-ci l'on peut déduire tous les autres courants.

Digitized by Google

» CD : $L_3 = 200 - \frac{450}{5,8} = 122,3$

» AD : $L_4 = 450 - \frac{5120}{69,7} = 376,6$

» DG : $L'_5 = 490 - \frac{10600}{45} = 254$

» GE : $L''_5 = 200$ $i' = 9$

» CE : $L_6 = 270 - \frac{2330}{24,4} = 175,5$

» BHE : $L_7 = 790 - \frac{15 \times 530}{16,6} = 310$

d'où résultent les équations suivantes :

Maille ABCDA : $120\,\Delta_1 + 131,9\,\Delta_2 + 122,3\,\Delta_3 - 376,6\,\Delta_4 = 0$

» CDGEC : $122,3\,\Delta_3 + 254\,\Delta'_5 - 200\,\Delta''_5 - 175,5\,\Delta_6 = 0$

» BCEHB : $131,9\,\Delta_2 + 175,5\,\Delta_6 - 310\,\Delta_7 = 0$

On pourra en déduire les valeurs suivantes pour les densités maxima et les sections :

$\Delta_1 = 1$	$s_1 = 49,8$
$\Delta_2 = 1$	$s_2 = 33,2$
$\Delta_3 = 1$	$s_3 = 5,8$
$\Delta_4 = \frac{374,2}{376,6} = 0,995$	$s_4 = 70$
$\Delta''_5 = 1$	$s_5'' = 9$
$\Delta_6 = 1$	$s_6 = 24,4$
$\Delta'_5 = \frac{253,2}{254} = 0,995$	$s'_5 = 45,2$
$\Delta_7 = \frac{307,4}{310} = 0,99$	$s_7 = 16,8$

La comparaison avec les solutions précédentes donne le tableau suivant.

Digitized by Google

Solution :	Gerard (*)	fig. 6	fig. 8	page 27
Volume :	93.500	94060	89000	87060 (**)
Chute de tension maxima :	565	580	550	627,4 (***)

La dernière solution est donc la plus avantageuse au point de vue du poids de cuivre, elle est moins bonne au point de vue de la chute de tension que celle de la fig. 8.

LÉON OTS.

(*) Voir E. GERARD : *Leçons sur l'Électricité*, tome II, 7e édition, page 172.

(**) Détail : $120 \times 49,8 + 140 \times 33,2 + 200 \times 5,8 + 450 \times 70 + 490 \times 45,2 + 200 \times 9 + 270 \times 24,4 + 790 \times 16,8 = 5960 + 4650 + 1160 \times 31500 + 22100 + 1800 + 6590 + 13300 = 87,060$.

(***) Détail : $L_4 \Delta_4 + L'_5 \Delta'_5 = 374,2 + 253,2 = 627,4$.

Digitized by Google

CHRONIQUE.

21.33(045) **L'électrification des chemins de fer du réseau suburbain de Melbourne.**

L'attention des lecteurs de notre *Bulletin* a déjà été attirée sur cette question par un article publié en 1909 (1). De cet article, nous avons résumé et commenté le rapport de l'ingénieur-conseil bien connu, M. Merz, dans lequel ce dernier avait conclu à la supériorité du courant continu pour l'électrification du réseau suburbain de Melbourne. Les années 1909, 1910 et 1911 s'écoulèrent, toutefois, sans que les dirigeants de la Compagnie australienne ne jugeassent opportun d'entamer la réalisation du projet de M. Merz. Or, il fut constaté, en 1910 et 1911, sur les lignes étudiées, des accroissements imprévus du trafic-voyageur ; les prévisions de M. Merz qui avaient cependant été trop optimistes furent largement dépassées alors que rien n'avait été fait pour augmenter le confort offert aux voyageurs.

Ces circonstances incitèrent les directeurs de cette Compagnie à soumettre la question à un nouvel examen. MM. Merz et Mc Lellan furent chargés de remettre un rapport dont des extraits intéressants ont été publiés dans de nombreux périodiques (2) anglais. Ce second

(1) Voir E. Uytborck. *Rapport de M. Merz sur l'électrification du réseau des chemins de fer suburbains de Melbourne*, nº 3-4, 1909.

(2) Voir notamment : *The Railway Gazette*, 22 novembre 1912.

Digitized by Google

rapport conclut également à la supériorité du continu mais abandonne le troisième rail à tension modérée pour préconiser le fil aérien à la tension de 1,500 volts. Les partisans à outrance de l'emploi du courant monophasé pour la traction des chemins de fer ont été sans doute fort étonnés de constater qu'à notre époque il existait encore des ingénieurs capables de recommander l'adoption du courant continu. Cet étonnement s'est manifesté sous la forme de notes publiées dans les mêmes journaux par diverses personnalités, adversaires de l'emploi du courant continu, dans lesquelles la plupart des chiffres présentés par MM. Merz et Mc Lellan furent mis en doute.

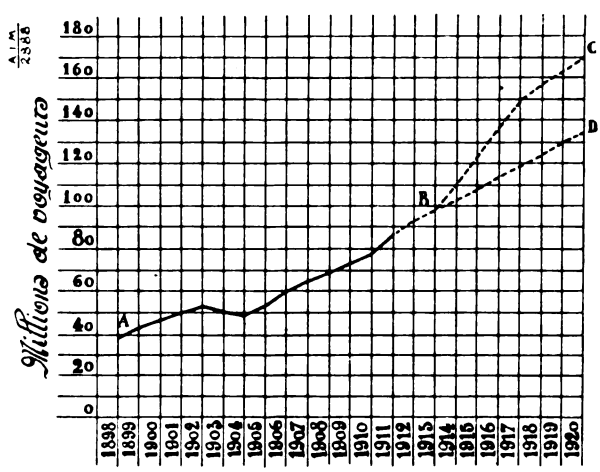


Fig. 1.

Il nous a semblé que nous devions à nos lecteurs de les tenir au courant de cette question parce qu'il paraît que la Compagnie australienne est cette fois fermement décidée à électrifier à bref délai son réseau suburbain et parce que nous espérons, dans ces conditions, que cette électrification sera une des premières électrifications de grand chemin de fer à courant continu à haute tension.

Digitized by Google

La fig. 1 donne une idée très nette de l'accroissement du trafic-voyageur constaté dans les dernières années et, présumé pour les années futures, dans l'hypothèse où la traction à vapeur serait maintenue A B D et dans celle de l'électrification A B C. En 1912 il y aura au minimum 90,000,000 de voyageurs et en 1917, après l'électrification, le trafic atteindra vraisemblablement 150,000,000 de voyageurs.

Fig. 2.

Digitized by Google

C'est sur un tel chiffre que MM. Merz et Mc Lellan ont basé leur étude.

La figure 2 reproduit les lignes du réseau suburbain. On peut y remarquer que les points les plus éloignés du réseau sont distants d'environ 118 kilomètres (Digger's Rest et Daudenong) et que l'alimentation de tout le réseau pourrait se faire aisément par une seule usine située aux environs de Melbourne, dans une situation très voisine du centre du réseau. De ce réseau très développé, une partie seulement est prévue comme devant être immédiatement électrifiée ; cette partie comprendra 140 kilomètres de longueur d'axe, soit 464 kilomètres de voie simple.

Les auteurs du projet ont adopté le mode d'exploitation suivant : les trains, sur toutes les lignes, partout où il est possible, se suivront à des intervalles de temps égaux pendant toute la journée ; le nombre de voitures des trains sera variable ; le nombre de places offertes étant toujours proportionné à l'intensité du trafic ; la fréquence des trains sera ajustée de façon qu'au début de l'exploitation par l'électricité les trains de six voitures suffiront au trafic.

MM. Merz et Mc Lellan ont donné des tableaux comparant les coûts d'installation et les dépenses d'exploitation dans l'hypothèse de l'emploi du courant continu et dans celle du courant monophasé. Comme l'intérêt que présente le rapport étudié réside surtout dans la comparaison des chiffres de ces tableaux, nous les reproduisons ci-dessous *in-extenso* :

Comme ces tableaux montrent :

1° que le coût de premier établissement du système monophasé est de 17,684,000 francs plus élevé que celui afférent au système à courant continu,

2° que le coût annuel d'exploitation du système mono-

Digitized by Google

phasé est de 1,764,000 francs plus élevé que le coût d'exploitation par courant continu,
les auteurs n'hésitent pas à conclure en faveur du courant continu, solution qui, d'après eux, montrera des avantages de plus en plus marquants au fur et à mesure de l'augmentation du trafic.

Le rapport montre par des développements, trop longs à reproduire ici, que le courant continu se prêtera admirablement, à tous les points de vue, à l'électrification éventuelle des lignes principales sortant du réseau suburbain.

Les auteurs terminent leur rapport par la publication de deux derniers tableaux que nous reproduisons ci-dessous et qui renseignent utilement le lecteur sur ce que serait la traction à vapeur en 1915 et ce que serait la traction électrique la même année.

Il convient de commenter certains postes de dépenses du tableau II. Les auteurs du projet évaluent à 505,000 francs la dépense à résulter des modifications aux circuits télégraphiques et téléphoniques dans l'hypothèse du courant continu et à 4,600,000 la même dépense dans l'hypothèse du courant monophasé, soit une différence de plus de 4,000,000 de francs en faveur du courant continu. Cette différence nous paraît exagérée, puisqu'on constate de la part des administrations des télégraphes et des téléphones une tendance très marquée à rendre souterrains tous leurs circuits à l'approche des grandes villes et que, de plus, les effets d'induction existent pour les deux genres de courant et demanderont pour les annuler des dépenses sensiblement équivalentes dans l'une ou l'autre alternative.

Les équipements moteurs à courant continu sont portés à 23,900,000, ceux à courant monophasé à 49,750,000, soit plus du double : nous voyons là également une exagéra-

Digitized by Google

TABLEAU I.

Caractéristiques des deux projets d'électrification étudiés.

A. — **Usine centrale.**	*Courant continu.*	*Courant monophasé.*
Source d'énergie . . .	Usine centrale à Yarraville.	Usine centrale à Yarraville.
Type d'énergie électrique produite	Triphasé, 25 périodes par seconde.	Triphasé, 25 périodes par seconde.
Nombre de chaudières	24	24
Vaporisation horaire normale de chaque chaudière	13,600 kgs.	13,600 kgs.
Nombre de groupes électrogènes	6	6
Puissance de rendement maximum de chaque groupe . . .	10,000 kw.	10,000 kw.
Puissance maximum continue de chaque groupe	12,500 volts.	12,500 kw.
Voltage à la sortie des transformateurs élévateurs de tension. . .	20,000 volts.	20,000 volts.
B. — **Transport d'énergie.**	Yarraville à 12 sous-stations.	Yarraville à 6 cabines de sectionnement.
	12 sous-stations contenant chacune des transformateurs statiques, commutatrices et tableau.	6 cabines de sectionnement contenant chacune un tableau pour diviser les lignes adductrices d'énergie en 3 groupes connectés chacun à une phase de la distribution.

Digitized by Google

TABLEAU I. (SUITE).

Caractéristiques des deux projets d'électrification étudiés.

B. — **Transport d'énergie.**	*Courant continu.*	*Courant monophasé.*
Type de courant alimentant les véhicules	Courant continu à 1,500 volts.	Courant monophasé à 11,000 volts.
Type des contacts . .	Fil de cuivre.	Fil de cuivre
Section de ces conducteurs :		
Voies principales . .	320 mm².	107 mm².
Voies de garage . . .	80 mm².	80 mm².
Circuit de retour . . .	Rails de roulement éclissés électriquement.	Rails de roulement éclissés électriquement.
C. — **Matériel roulant.**		
Type de trains . . .	à unités multiples	à unités multiples.
Nombre de voitures motrices	500	500
Nombre de moteurs installés sur chaque motrice	4	4

Digitized by Google

TABLEAU II.

Comparaison des coûts de premier établissement (1) :

	Courant continu.	*Courant monophasé.*
	FRANCS.	FRANCS.
A. — **Usine génératrice.**		
Turbo-alternateurs, transformateurs, élévateurs de tension, transformateurs auxiliaires, condenseurs	5,000,000	6,100,000
Tableau, moteurs auxiliaires, canalisations et locomotive de cour	1,190,000	1,170,000
B. — **Transport d'énergie aux sous-stations ou cabines de sectionnement.**		
Câbles souterrains à 20,000 volts . .	2,675,000	2,775,000
Lignes aériennes à 20,000 volts . . .	1,560,000	535,000
C. — **Sous-stations ou cabines de sectionnement.**	9,500,000	1,000,000
D. — **Equipement électrique d'adduction d'énergie.**		
a) Fils de contact (matériel seulement) voies principales	3,600,000	1,210,000
Voies de garage.	108,000	108,000
b) Erection des conducteurs, supports, isolateurs, câbles de connexion, interrupteurs et isolateurs de section, éclissage électrique de la voie	10,600,000	9,100,000
E. — **Modifications aux voies et ouvrages d'art.**		
a) Augmentation de hauteur libre sous les ponts	111,000	625,000
b) Modifications aux circuits télégraphiques et téléphoniques	505,000	4,000,000
F. — **Matériel roulant.**		
Equipement électrique de 500 voitures motrices et 450 voitures remorquées . .	23,900,000	49,750,000
Totaux :	59,349,000	77,033,000

(1) Dans ce tableau ont été omis tous les postes donnant lieu aux mêmes dépenses dans les deux hypothèses.

Digitized by Google

TABLEAU III.

Comparaison des consommations d'énergie électrique.

Consommation d'énergie électrique.	*Courant continu.*	*Courant monophasé.*
Nombre de kilowatts-heure consommé par un train de quatre voitures parcourant un circuit entre Sandringham et Broadmeadows, d'après la soumission la plus avantageuse	430	530
Nombre de kilowatts-heure consommé annuellement par tout le système :		
a) Par les trains (calculé en tenant compte des rampes, éclairage, ventilation, etc.)	108,503,000	117,000,000
b) Perdus entre les sous-stations ou cabines de sectionnement et les trains .	4,626,000	1,746,000
c) Perdus dans la transformation et cabines de sectionnement.	12,337,000	140,000
d) Perdus dans les lignes de transport d'énergie à haute tension	3,796,000	5,074,000
Total des kilowatts-heure débités par l'usine génératrice	129,262,000	123,960,000

TABLEAU IV.

Comparaison des dépenses annuelles d'exploitation.

Dépenses annuelles	*Courant continu.*	*Courant alternatif.*
Énergie électrique :		
Dépenses proportionnelles de production comprenant charbon, eau, magasins, salaires, etc. (1)	1,500,000	1,480,000
Inspection et entretien des lignes de transport d'énergie à haute tension . .	81,000	55,000
Exploitation et entretien des sous-stations ou cabines de sectionnement. .	314,000	40,000
Entretien et renouvellement des lignes de contact	456,000	456,000
Entretien du matériel roulant :		
a) Inspection, nettoyage, magasin et petites réparations	580,000	780,000
b) Réparations et renouvellement . .	1,100,000	2,300,000
Intérêt du capital	2,475,000	3,150,000
	6,506,000	8,270,000

(1) Ces chiffres ne sont pas exactement proportionnels aux nombres de kilowatts-heures donnés précédemment, parce que le mauvais facteur de puissance du système monophasé réduit légèrement le rendement moyen des alternateurs.

Digitized by Google

TABLEAU V.

Comparaison de caractéristiques d'exploitation en 1915.

	Vapeur.	*Électricité.*
Nombre annuel de trains kilomètres	6,800,000	8,750,000
Nombre annuel de voitures kilom. non compris les parcours à vide. . .	41,000,000	39,600,000
Rapport entre les vitesses commerciales	1	1,31

TABLEAU VI.

Comparaison des dépenses annuelles d'exploitation en 1915.

Électricité :	
Production et distribution de l'énergie électrique (non compris le service du capital, mais y compris les dépenses d'exploitation du transport d'énergie, sous-stations et l'équipement des voies).	Frs 1,670,000
Personnel des trains :	
Wattman	» 880,000
Receveurs.	» 710,000
Réparations du matériel roulant :	
Équipements, visite, nettoyages et petites réparations	» 302,000
Réparations et renouvellements. . .	» 748,000
Réparations aux voitures et bogies. .	» 1,260,000
Supplément au personnel des stations et des cabines de signalisation qui serait nécessaire pour la traction à vappeur. .	» 290,000
	Frs 5,950,000
Vapeur :	
Coût du service des trains, personnel, nettoyeurs, charbon, etc., éclairage des trains : 0,932 le train kilomètre	Frs 6,330,000
Coût des réparations du matériel roulant :	
Locomotives à frs 0,222 le train kilom.	» 1,520,000
Voitures à frs 0,176 le train kilom. .	» 1,250,000
	Frs 9,100,000

Digitized by Google

tion. A notre avis les équipements électriques d'automotrices à courant monophasé coûtent environ 50 % plus cher que les équipements équivalents à courant continu. En tenant compte de ces deux remarques nous arriverions sensiblement à l'égalité des dépenses de premier établissement, qui s'élèveraient, dans les deux hypothèses, à 65,000,000 de francs environ.

En se basant sur cette conclusion, les totaux du tableau IV (comparaison des dépenses annuelles d'exploitation) sont à modifier également et nous trouvons 6,730,000 francs pour le courant continu et 7,800,000 francs pour le courant monophasé, soit une différence de 1,070,000 ou de 15 % en faveur du courant continu, ce qui justifie encore très largement les conclusions des ingénieurs-conseils anglais.

Les détracteurs du courant continu ne manqueront pas de faire remarquer que si l'on est arrivé à un chiffre aussi élevé pour le coût de premier établissement de l'hypothèse « courant monophasé », c'est parce que l'on a prévu l'emploi de voitures automotrices, alors qu'il eût été plus économique de prévoir des locomotives.

Nous croyons que MM. Merz et Mc Lellan ont judicieusement choisi le type de véhicule moteur, car nous avons l'intime conviction que l'on ne verrait pas autant de locomotives monophasées si les complications et le coût des voitures automotrices monophasées n'étaient pas pour ainsi dire prohibitifs de leur emploi.

En tout état de cause il semble que le programme énoncé au début de ce court exposé, pour l'exploitation du réseau suburbain de Melbourne, est bien celui qui doit caractériser une telle exploitation. Si l'on avait dû recourir à des locomotives, il aurait fallu créer au minimum deux types de puissance différente, qui n'auraient que rarement été utilisés dans les meilleures conditions de rendement.

Digitized by Google

Remarquons, enfin, que la source première de l'énergie à utiliser pour la traction électrique est, dans le cas qui nous occupe, le charbon et, qu'à l'encontre de ce qui se passe dans les réseaux de traction raccordés à des usines hydro-électriques, toute diminution de consommation d'énergie électrique correspond à une diminution de dépenses.

L'avenir enseignera si c'est bien la nature de la source d'énergie qui sera le facteur déterminatif prépondérant du genre de courant à adopter pour les électrifications de chemins de fer.

E. Uytborck.

Digitized by Google

SÉANCE DU 30 NOVEMBRE 1913.

M. J. Libert, *vice-président*, au fauteuil.

Ont signé la liste de présence : MM. Bayet ; Binder ; Biske ; Calmeau ; Comhaire, H. ; De Bast ; Defize ; Forgeur (Bon) ; Gerard, André ; Gerard, Eric ; Gosseries ; Grimaldi ; Grottendieck ; Gunzbourg ; Hiller ; Kondaki ; Küntziger ; L'Hoest, L. ; Libert ; Movchovitch ; Nollet ; Pirard ; Prentki ; Radulescu ; Watelet.

M. J. Libert dépose sur le bureau les ouvrages suivants offerts à l'Association :

Notions sur les Accumulateurs électriques, par Paul Gadot ; H. Dunod et E. Pinat, Paris, 1913.

La Télégraphie sans fil, la télémécanique et la téléphonie sans fil à la portée de tout le monde, par E. Monier ; H. Dunod et E. Pinat, Paris, 1913.

Chaudières à gaz d'échappement, par L. Greiner ; Charles Desoer, Liége, 1913.

La parole est donnée au camarade **M. Bayet** pour sa communication sur la réalisation des projections lumineuses et cinématographiques par l'emploi de lampes à incandescence de faible consommation.

M. J. Libert remercie l'orateur dont la conférence, exposée avec humour et originalité et accompagnée d'expériences, a été écoutée avec plaisir et intérêt.

La séance est levée à 13 heures.

Digitized by Google

MÉMOIRES.

621.315.14

Cercle à calculs spécial pour déterminer les éléments de pose d'un fil.

Soit θ la différence entre la température de pose du fil et la température à laquelle le fil, d'une portée a mètres, aurait la longueur a s'il était libre. A la température de pose, la longueur du fil libre est

$$a(1 + \delta\theta).$$

δ, coefficient de dilatation par degré centigrade.

A la température de pose, tendu sous la tension t kilogs par millimètre carré, le fil a une longueur

$$a(1 + \delta\theta + \varepsilon t) = a + a\frac{\pi^2}{24\,t^2}.$$

ε, allongement élastique proportionnel pour une charge de 1 kilog par millimètre carré.

π, poids en kilogs rapporté à l'unité de section, millimètre carré, du fil de la portée.

Nous déduisons :

$$24(\delta\theta + \varepsilon t)\,t^2 = \pi^2 \qquad (1)$$

Supposons que la portée devienne $a + da$, la différence θ_1 entre la température de pose et la température à laquelle le fil de la portée aurait la longueur $a + da$, s'il était libre, sera donnée par l'équation :

$$a(1 + \delta\theta) = (a + da)(1 + \delta\theta_1)$$

Digitized by Google

d'où

$$a\,\delta\,\theta = a\,\delta\,\theta_1 + da + \delta\,\theta_1\,da.$$

$\delta\,\theta_1\,da$ est négligeable devant da et

$$a\,\delta\,(\theta_1 - \theta) + da = o$$

$$\theta_1 - \theta = d\,\theta$$

$$\delta\,d\,\theta + \frac{da}{a} = o$$

$$\delta\theta + \mathrm{L}a = \mathrm{C}$$

soit T la température de pose du fil, le o de température étant choisi de telle sorte que $\delta\,\mathrm{T} = \mathrm{C}$, nous avons

$$\delta\,\theta = \delta\,\mathrm{T} - \mathrm{L}a$$

l'équation (1) devient

$$24\,(\delta\,\mathrm{T} - \mathrm{L}a + \varepsilon\,t)\,t^2 = \pi^2. \qquad (1')$$

L'un des trois éléments T, a ou π variant, cette équation permet de déterminer la variation correspondante de t. Dans l'équation (1'), le o de température choisi est tel que le fil d'une portée a aurait la longueur a, s'il était libre, à la température $\mathrm{L}a/\delta$.

On peut employer indifféremment l'équation (1) ou l'équation (1'), mais dans l'équation (1) au o de température choisi le fil de la portée a, s'il était libre aurait la longueur a. Avec l'équation (1) il faut tenir compte de la relation

$$\delta\,d\,\theta + \frac{da}{da} = o.$$

La flèche f, en mètres, est reliée aux éléments t, a, π par l'équation

$$f = \frac{a}{8}\,\frac{\pi}{t} \qquad (2)$$

Digitized by Google

et

$$\pi = p\,a \tag{3}$$

p, poids en kilogs d'un mètre de fil de 1 millimètre carré de section.

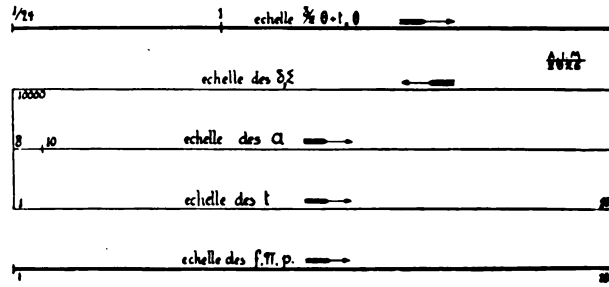


Fig. 1.

Une règle à calculs disposée spécialement, comme l'indique le schéma de la figure 1, traduit ces équations (1), (2), (3).

Les échelles de a, t, f, π, p sont doubles des échelles δ, ε, $\delta/\varepsilon\,\theta + t$, θ. Autrement dit les échelles de a, t, f, π, p s'étendent de 10^n à 10^{n+2} et les échelles de δ, ε, $\delta/\varepsilon\,\theta + t$, θ s'étendent de 10^n à 10^{n+4} pour une même longueur de règle.

Les origines des échelles sont indiquées sur le schéma ; elles sont choisies de façon à ce que tout se passe dans le maniement de la règle comme si les facteurs 24 et 8 étaient égaux à 1. Le sens des échelles est indiqué par des flèches ; l'échelle $\delta\,\varepsilon$ est retournée.

En mettant a en regard de π, on trouve p en regard de l'indicateur de l'échelle a (équation 3), un mouvement de réglette) ; f et a étant en regard, π et t sont en coïncidence (équation 2), un mouvement de réglette). Du même coup, on obtient $\delta/\varepsilon\,\theta + t$ en face de ε (équation (1)). Par sous-

Digitized by Google

traction, on déduit $\delta/\varepsilon\,\theta$. Plaçons ensuite ε en face de $\delta/\varepsilon\,\theta$, nous obtenons θ en face de δ.

Si on connait $\delta/\varepsilon\,\theta$ et π, on dispose l'appareil de façon que la différence entre le nombre $\delta/\varepsilon\,\theta + t$ en face de ε et le nombre t (cherché) en face de π, soit $\delta/\varepsilon\,\theta$ (méthode de M. Cloeren).

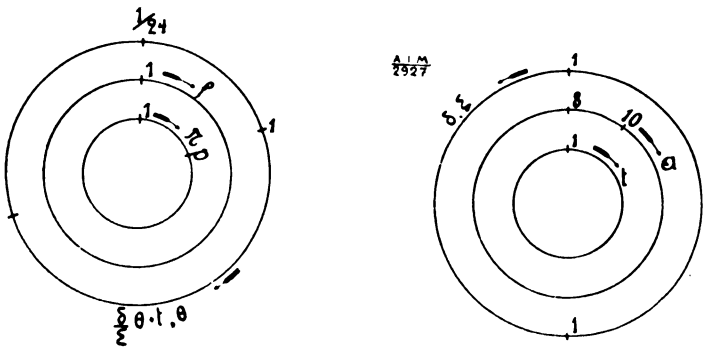


Fig. 2.

Nous avons réalisé un cercle à calculs sur le principe donné ci-dessus de la règle à calculs. Les échelles de ce cercle à calculs s'étendent de 10^n à 10^{n+1} pour a, t, f, π, p et de 10^n à 10^{n+2} pour δ, ε, $\delta/\varepsilon\,\theta + t$, θ.

Avec le cercle à calculs, les échelles sont deux fois moins étendues qu'avec la règle à calculs.

Avec le cercle à calculs, les traits peuvent être mis en coïncidence sans curseur.

La figure 2 montre la disposition de ce cercle à calculs.

Applications.

I. — *Variation de température.*

Un fil de cuivre tendu avec une tension de 14 kilogs à — 20° centigrades sur une portée de 75 mètres a une

Digitized by Google

flèche de 0,45^m. Quelles seront les tension et flèche à + 40° centigrades.

$\delta = 16 \times 10^{-6}$

$\varepsilon = 78 \times 10^{-6}$

Mettre 750 (a) en regard de 450 (f)

lire 675 (π) en regard de 140 (t) $\pi = 0{,}675$ kilogs

lire 124 ($\delta/\varepsilon\,\theta + t$) en regard de 780 ($\varepsilon$) $\delta/\varepsilon\,\theta + t = 1{,}24$

$t = 14{,}00$

$\delta/\varepsilon\,\theta = -12{,}76$

La température augmente de 60°,

$\delta/\varepsilon\,\theta$ augmente de $\delta/\varepsilon \,.\, 60$ $\delta/\varepsilon\,60 = 12{,}30$

$\delta/\varepsilon\,\theta_1 = -0{,}46$

Disposer l'appareil de sorte que la différence entre le nombre t en face de 675 (π) et le nombre $\delta/\varepsilon\,\theta + t$ en face de 780 (ε), soit 0,46

$t = 6{,}35$ kilogs.

$f = 0{,}995$ mètres.

II. — *Surcharge du fil.*

Un fil de 2 mm. de diamètre en cuivre est tendu à 20 kilogs, à + 10° C sous un vent exerçant une pression de 72 kilogs par mètre carré de section longitudinale. La portée est de 75 mètres, le poids p du fil est 0,0089 kilogs. On demande la tension et la flèche par air calme à 0° C.

Une pression P kilogs par mètre carré du vent donne sur un fil de 1 mètre de longueur et de d millimètres de diamètre

$$Pd \times 10^{-3} \text{ kilogs.}$$

Pour une portée a la charge est :

$$Pda \times 10^{-3} \text{ kilogs.}$$

Par unité de section, elle est

$$Pda \times 10^{-3} \times 3{,}1831 \times 10^{-1} \frac{4}{d^2} = \frac{Pa}{d} \times 1{,}27 \times 10^{-3}.$$

Digitized by Google

Dans le cas présent, la surcharge est :

$$\pi_1 = \frac{72 \times 75}{2} \times 1{,}27 \times 10^{-3} = 3{,}43$$

le poids π est

$$\pi = 75 \times 0{,}0089 = 0{,}67$$
$$\pi_1^2 = 11{,}8$$
$$\pi^2 = 0{,}45$$
$$\pi^2 + \pi_1^2 = 12{,}25$$
$$\sqrt{\pi^2 + \pi_1^2} = 3{,}50$$
$$24\,\varepsilon \left(\frac{\delta}{\varepsilon}\,\theta + 20\right) \overline{20}^2 = \overline{3{,}50}^2$$

$$\delta/\varepsilon\,\theta + 20 = 16{,}40$$

La température s'abaisse de 10°, $\delta/\varepsilon\,\theta$ diminue de $\delta/\varepsilon \,.\, 10$

$$\delta/\varepsilon\,\theta = -3{,}60$$
$$\delta/\varepsilon \,.\, 10 = 2{,}05$$
$$\delta/\varepsilon\,\theta_1 = -5{,}65$$

Disposer l'appareil de façon que la différence entre le nombre t en face de 670 (π) et le nombre $-5{,}65 + t$ en face de 780 (ε) soit $-5{,}65$.

$$t = 8{,}75 \text{ kilogs}$$
$$f = 0{,}715 \text{ mètres}$$

III. — Deux portées successives ont respectivement 70 mètres et 60 mètres. La flèche de la première est 0,65 mètres, la flèche de la seconde 0,55 mètres. Le fil se détache de l'isolateur intermédiaire :

1r les portées étant en alignement droit, quelle est la nouvelle flèche ?

2° la ligne étant en légère courbe, la distance des poteaux extrêmes étant 129,90 mètres quelle est la nouvelle flèche. Les éléments de la première portée étant affectés de l'indice 1, ceux de la deuxième portée de l'indice 2, ceux de la portée résultante de l'indice 3, la lon-

Digitized by Google

gueur du fil libre à la température considérée entre les deux portées est

$$a_1 (1 + \delta \theta_1) + a_2 (1 + \delta \theta_2) = a_3 (1 + \delta \theta^3).$$

D'où

$$\theta_3 = \frac{a_1 (1 + \delta \theta_1) + a_2 (1 + \delta \theta_2) - a_3}{\delta a_3}$$

si les portées sont en ligne droite

$$a_1 + a_2 = a_3$$

$$\theta_3 = \frac{a_1 \theta_1 + a_2 \theta_2}{a_1 + a_2}.$$

Nous allons déterminer θ_1 et θ_2, en déduire θ_3

$$\begin{aligned} \pi_1 &= 70 \times 0{,}0089 = 0{,}623 \\ t_1 &= 8{,}40 \\ \delta/\varepsilon\, \theta_1 + t_1 &= 2{,}90 \\ \hline \delta/\varepsilon\, \theta_1 &= -5{,}50 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \pi_2 &= 60 \times 0{,}0089 = 0{,}534 \\ t_2 &= 7{,}30 \\ \delta/\varepsilon\, \theta_2 + t_2 &= 2{,}85 \\ \hline \delta/\varepsilon\, \theta_2 &= -4{,}45 \end{aligned}$$

1° $$\frac{\delta}{\varepsilon} \theta_3 = -\frac{70 \times 5{,}50 + 60 \times 4{,}45}{130} = -\frac{652}{130} = -5{,}02$$

$\pi_3 = \pi_1 + \pi_2 = 1{,}157$
$t_3 = 10{,}95$ kilogs
$f_3 = 1{,}71$ mètres.

2° $$\frac{\delta}{\varepsilon} \theta_3 = \frac{\frac{a_1 + a_2 - a_3}{\varepsilon} + a_1 \frac{\delta}{\varepsilon} \theta_1 + a_2 \frac{\delta}{\varepsilon} \theta_2}{a_3} = \frac{\frac{10^5}{78} - 652}{129{,}9} = 4{,}85$$

$t_3 = 7{,}59$ kilogs
$f_3 = 2{,}46$ mètres.

Digitized by Google

IV. — *Variation de la portée.*

Dans une ligne la tête d'un poteau se déplace de 0,12 mètres dans le sens de la ligne, la portée courante était de 75 mètres, la flèche était de 0,50 mètre. Quelles sont les nouvelles flèches et nouvelles tensions dans les portées adjacentes, $p = 0{,}0089$? Employer la formule (1)'.

Du côté où la portée est $a + da$, $\delta T - La$ devient :

$$\delta T - La - \frac{da}{a}$$

$$\frac{da}{\varepsilon a} = \frac{12 \times 10^{2}}{78 \times 10^{6} \times 75} = \frac{2 \times 10^{4}}{13 \times 75} = 20{,}5$$

$$t = 12{,}55$$

$$\frac{\delta T - La}{\varepsilon} + t = 1{,}52$$

$$\frac{\delta T - La}{\varepsilon} = -11{,}03$$

$$\frac{da}{a\varepsilon} = 20{,}50$$

$$\frac{\delta T - La - \frac{da}{a}}{\varepsilon} = -31{,}53$$

$$t_1 = 31{,}8 \text{ kilogs}$$

$$f_1 = 0{,}196 \text{ mètre.}$$

Du côté où la portée est $a - da$, $\delta T - La$ devient

$$\delta T - La + \frac{da}{a}$$

$$\frac{\delta T - La}{\varepsilon} = -11{,}03$$

$$\frac{da}{a\varepsilon} = 20{,}50$$

$$\frac{\delta T - La + \frac{da}{a}}{\varepsilon} = 9{,}47$$

Digitized by Google

$$t_2 = 4{,}15 \text{ kilogs}$$
$$f_2 = 1{,}51 \text{ mètres}$$

V. Une ligne aérienne, composée uniformément en alignement droit, vient à se rompre dans une portée. Déterminer les nouvelles tensions.

Données : portées 60 mètres
tension primitive 8 kilogs par millimètre carré
section totale des fils 30 millimètres carrés
flèche d'un poteau pour 1 kilog. de tension 532×10^{-6} mètres

$p = 0{,}0089$
$\delta = 16 \times 10^{-6}$
$\varepsilon = 78 \times 10^{-6}$

Pour 1 kilog de tension par mm² la flèche du poteau sera

$$532 \times 10^{-6} \times 30 = 1596 \times 10^{-5}$$
$$k = 1596 \times 10^{-5}$$

Nous affectons de l'indice n les éléments de la N^ième portée.

$$da_1 = -kt_1 + k(t_2 - t_1) = k(o - 2t_1 + t_2)$$
$$da_2 = -k(t_2 - t_1) + k(t_3 - t_2) = k(t_1 - 2t_2 + t_3)$$
$$da_3 = -k(t_3 - t_2) + k(t_4 - t_3) = k(t_2 - 2t_3 + t_4)$$

. . . . . .

On avait avant rupture :

$$24(\delta T - La + \varepsilon t)\, t^2 = \pi^2.$$

On a après rupture :

$$24\left(\delta T - La - \frac{K}{a} t_2 + \left(\varepsilon + \frac{2K}{a}\right) t_1\right) t_1^2 = \pi^2 \qquad \text{(I)}$$

$$24\left(\delta t - La - \frac{K}{a}(t_1 + t_3) + \left(\varepsilon + \frac{2K}{a}\right) t_2\right) t_2^2 = \pi^2 \qquad \text{(II)}$$

$$24\left(\delta T - La - \frac{K}{a}(t_2 + t_4) + \left(\varepsilon + \frac{2K}{a}\right) t_3\right) t_3^2 = \pi^2 \qquad \text{(III)}$$

. . . . . .

Digitized by Google

$$\pi = 60 \times 0{,}0089 = 0{,}535$$

$$t = 8{,}00$$

$$\frac{\delta T - L a}{\varepsilon} + t = 2{,}40$$

$$\frac{\delta T - L a}{\varepsilon} = -5{,}60$$

$$\delta T - L a = -440 \times 10^{-6}$$

Nous calculons une limite inférieure de t_1 en supposant le second poteau rigide.

$$24 \left(\delta T - L a + \left(\varepsilon + \frac{K}{a}\right) t_1\right) t_1^2 = \pi^2$$

$$\frac{K}{a} = \frac{0{,}01596}{60} = 266 \times 10^{-6}$$

$$\varepsilon = 78 \times 10^{-6}$$

$$\varepsilon + \frac{K}{a} = 344 \times 10^{-6}$$

$$24 \times 344 \times 10^{-6} \left(-\frac{440}{344} + t_1\right) t_1^2 = 0{,}535^2$$

$$t_1 = 3{,}74$$

Nous calculons une limite supérieure de t_1 en faisant $t_2 = 8$.

$$24 \left(\delta T - L a - \frac{K}{a} 8 + \left(\varepsilon + 2\frac{K}{a}\right) t_1\right) t_1^2 = \pi^2$$

$$\delta T - L a = -440 \times 10^{-6}$$

$$-\frac{K}{a} \cdot 8 = -266 \times 10^{-6} \times 8 = -2128 \times 10^{-6}$$

$$\delta T - L a - \frac{K}{a} 8 = -2568 \times 10^{-6}$$

$$\varepsilon = 78 \times 10^{-6}$$

$$\frac{2K}{a} = 532 \times 10^{-6}$$

$$\varepsilon + \frac{2K}{a} = 610 \times 10^{-6}$$

Digitized by Google

$$24 \times 610 \times 10^{6}\left(-\frac{2568}{610}+t_1\right)t_1^2 = \overline{0,535}^2$$
$$t_1 = 4,95$$

Les nombres t_1, t_2, t_3... constituent une suite de nombres allant en croissant, le nombre t_n tendant vers 8 et le nombre t_1 étant compris entre 3,74 et 4,95.

La suite des nombres définis par la formule

$$t_n = 8 - \frac{4}{n^2}$$

répond à ces deux conditions.

Essayons si elle satisfait aux équations (I), (II), (III), etc.

Nous obtenons le tableau suivant :

	t suivant la formule	$\dfrac{\delta T - La - \frac{K}{a}(t_n - 1 + t_n + 1)}{\varepsilon + \frac{2K}{a}}$	t résultant des équations
1	4	— 3,77	4,65
2	7	— 5,75	6,25
3	7,55	— 7,15	7,50
4	7,75	— 7,43	7,75
5	7,85	— 7,55	7,85
6	7,90	— 7,60	7,90
7	7,92	— 7,63	7,92
8	7,94	— 7,64	7,94
9	7,95	— 7,65	7,95
10	7,96	— 7,66	7,96

A partir du terme t_4, les nombres $t_n = 8 - \frac{4}{n^2}$ conviennent bien.

Digitized by Google

Pour le terme t_3 essayons 7,55.

De $t_n = 7{,}55$, on déduit

$$\frac{\delta T - La - \frac{K}{a}(t_n - 1 + t_n + 1)}{\varepsilon + \frac{2K}{a}} = -7{,}20$$

D'où
$$\begin{aligned} t_n - 1 + t_n + 1 &= 14{,}86 \\ t_n + 1 &= 7{,}75 \\ \hline t_n - 1 &= 7{,}11 \end{aligned}$$

De $t_n - 1 = 7{,}11$, on déduit $t_n - 2 = 6{,}21$

De $t_n - 2 = 6{,}21$, on déduit $t_n - 3 = 4{,}35$

Si dans l'équation (I), on fait $t_n - 2 = 6{,}21$, on trouve, d'autre part, $t_n - 3 = t_1 = 4{,}43$.

Nous n'avons plus qu'un écart de 0^k080 sur la tension de la première portée.

Essayons le terme 7,56. Nous déduisons successivement

$$\begin{aligned} t_n - 1 &= 7{,}15 \\ t_n - 2 &= 6{,}30 \\ t_n - 3 &= t_1 = 4{,}54 \end{aligned}$$

Mais 6,30 essayé dans l'équation (I) donne pour t_1 : 4,45. Nous obtenons un écart de 0^k090 sur la première tension, mais en sens inverse du précédent.

Nous prenons la moyenne des résultats

$$4{,}44 - 6{,}25 - 7{,}13 - 7{,}55 - 7{,}75$$

La concordance obtenue est suffisante et la question est résolue.

J. Desplanques.

Digitized by Google

621.317.2 **Note sur une méthode de mesure des résistances des terres.**

La mesure des résistances des terres se fait en général au pont de Kohlraùsch, avec téléphone. La méthode exige que l'on dispose de trois terres, x, y, z, ce qui permet de mesurer successivement $x + y$, $x + z$ et $y + z$. On peut ainsi établir trois équations à trois inconnues et en déduire les valeurs des trois résistances.

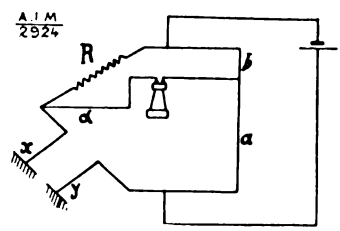


Fig. 1.

La figure 1 donne le schéma de la disposition utilisée. Lorsqu'on obtient le silence du téléphone, on a :

$$(x + y)\, b = \mathrm{R}a\,;$$

d'où

$$x + y = \frac{a}{b}\,\mathrm{R},$$

ab étant le fil à curseur et R la résistance de comparaison. La valeur de a/b est lue directement sur l'échelle à curseur.

On aura de même $x + z$ et $y + z$.

On sait que le minimum d'erreur s'obtiendra, dans

Digitized by Google

chacune des trois opérations, en réglant R de telle façon que a/b soit aussi rapproché de 1 que possible. Si on n'a qu'une résistance x à mesurer, il faut créer deux résistances artificielles, par exemple au moyen de plaques en tôle enfoncées dans le sol. Si on doit mesurer deux résistances x et y, on devra créer une seule terre artificielle auxiliaire.

* * *

La méthode que nous venons de rappeler présente, comme nous allons le montrer, l'inconvénient d'être grossière quand les valeurs des résistances à mesurer sont sensiblement plus petites que celles des résistances auxiliaires, ce qui est un cas fréquent.

Ainsi, supposons que l'on ait à mesurer une petite résistance x et que l'on utilise deux résistances auxiliaires y et z beaucoup plus grandes. On aura :

$$\begin{cases} x + y = m \\ x + z = n \\ y + z = p \end{cases}$$

$$x = \frac{m + n - p}{2}$$

L'erreur absolue limite qui pourra être commise sur x sera :

$$dx = \frac{1}{2}\left(\frac{dm}{da}\,da + \frac{dn}{da'}\,da' + \frac{dp}{da''}\,da''\right),$$

da, da', da'' étant, dans les trois opérations, les erreurs commises sur a, a', a'' et provenant d'une mauvaise position du curseur.

Or : $$\frac{dm}{da}\,da = \frac{d}{da}\left(R\frac{a}{b}\right) = \frac{d}{da}\left(R\frac{a}{L-a}\right),$$

L étant la résistance totale du fil à curseur.

Digitized by Google

D'où : $\frac{dm}{da} da = \frac{RL}{(L-a)^2} da = \frac{Ra}{b} \frac{L}{ab} da = m \frac{L}{ab} da.$

Comme nous l'avons rappelé, cette expression sera minimum pour $a = b = 1/2$ L.

Alors : $\frac{dm}{da} da = \frac{4m}{L} da$ (1).

Par conséquent :

$$dx = 1/2 \left(\frac{4m}{L} da + \frac{4n}{L} da' + \frac{4p}{L} da'' \right),$$

et, en admettant que $da = da' = da''$:

$$dx = \frac{2}{L} (m + n + p) da = \frac{4}{L} (x + y + z) da$$

$$\frac{dx}{x} = \frac{4}{L} \left(1 + \frac{y+z}{x} \right) da.$$

$y + z$ étant beaucoup plus grand que x, on voit que l'erreur relative commise sur x pourra être énorme.

Supposons, par exemple, que nous ayons à mesurer une résistance dont la valeur est de 2 ohms et que nous établissions deux résistances auxiliaires de 50 et 60 ohms respectivement. Si nous ne commettons pas d'erreur, nous devrons lire, au cours des essais :

$$\begin{cases} x + y = m = 52 \\ x + z = n = 62 \\ y + z = p = 110 \end{cases}$$

d'où : $x = \frac{m + n - p}{2} = 2$ ohms.

Mais supposons que nous fassions à chaque lecture une erreur de 1 % sur a.

Digitized by Google

On aura : $da = 0{,}01\ a = 0{,}01\ L/2$.

Et l'erreur relative limite commise sur x pourra atteindre :

$$\frac{dx}{x} = \frac{4}{L}\left(1 + \frac{y+z}{x}\right) 0{,}01\ \frac{L}{2} = 0{,}02\left(1 + \frac{50+60}{2}\right)$$

$$= 1{,}12 \text{ ohm, soit } 56\ \%.$$

C'est ce que nous pouvons faire ressortir de façon plus tangible comme suit :

A une erreur de 1 % sur a correspond, d'après l'équation (1), l'erreur suivante sur a/b.

$$\frac{dm}{m} = 4\ \frac{da}{L} = 2\ \frac{da}{\frac{L}{2}} = 2\ \frac{da}{a} = 2\ \%.$$

La même erreur de 2 % pourra être commise sur n et sur p. Les erreurs absolues de m, n, p, seront donc approximativement de 1,1 et 2 ohms respectivement. Dans le cas le plus défavorable, on pourra donc lire :

$x + y =$ 53 (erreur de 1 ohm en plus)
$x + z =$ 63 (id. id.)
$y + z =$ 108 (id. de 2 ohms en moins).

D'où l'on tirera :

$$x = \frac{53 + 63 - 108}{2} = 4 \text{ ohms}$$

(au lieu de 2 ohms).

On pourrait émettre des considérations analogues dans le cas de la mesure de deux faibles résistances x et y, la résistance de la terre auxiliaire z étant forte.

Ainsi, pour $x = 2$ ohms, $y = 3$ ohms, $z = 50$ ohms, on aura, pour $da/a = 1$ %. dx/x limite $= 27$ %.

D'une façon plus tangible, on lira, dans le cas le plus

Digitized by Google

défavorable : $x + y = 5$; $x + z = 53$ (au lieu de 52) ; et $y + z = 52$ (au lieu de 53), d'où

$$x = \frac{5 + 53 - 52}{2} = 3 \text{ ohms}$$

(au lieu de 2 ohms).

* * *

La méthode que nous préconisons, et que nous employons depuis plusieurs années, est beaucoup plus précise. Elle présente du reste d'autres avantages, que nous signalerons plus loin. Elle nécessite, comme la première, l'utilisation de trois terres.

La première mesure est analogue à celle de la méthode ordinaire :

$$x + y = R\frac{a}{b} = m.$$

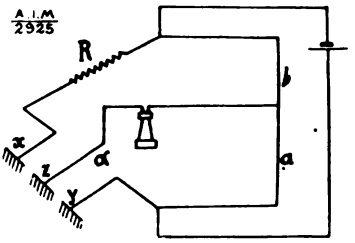


Fig. 2.

Pour effectuer la seconde mesure, on réalise la schéma de la figure 2. On voit qu'il suffit pour celà de déconnecter le fil α du téléphone et de le relier à la troisième terre. On se trouve ainsi dans les conditions représentées plus explicitement à la figure 3 et on peut écrire, quand le téléphone est silencieux :

$$(R + x)\, a = b \times y$$

$$\frac{y}{R + x} = \frac{a}{b} = n,$$

Digitized by Google

la valeur de a/b étant, comme dans le cas précédent, donnée directement par l'échelle à curseur.

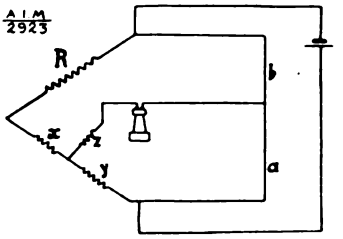


Fig. 3.

On peut démontrer que, pour obtenir la plus petite erreur dans la valeur d'une résistance x, il faut, si x est plus grand que y, connecter ces terres à l'appareil de façon que y soit en série avec R et régler R de manière à réaliser autant que possible $a/b = 1$. Par contre, si x est plus petit que y, il faut faire R = 0 et, dans ce cas, il est indifférent de réunir x et y au pont de l'une ou l'autre façon.

En effet, supposons que nous cherchions x et que les terres x et y soient connectées comme dans la figure 2.

Nous aurons :

$$\frac{y}{R + x} = \frac{a}{b} = \frac{a}{L - a}$$

d'où :

$$R + x = y\,\frac{L - a}{a} = \frac{y\,L}{a} - y.$$

Pour une erreur de lecture da commise sur a, nous aurons :

$$dx = -\frac{y\,L}{a^2}\,da = \text{, au signe près : } \frac{y\,L}{a^2}\,da.$$

On voit que dx sera minimum quand a sera maximum, donc quand R sera nul. Alors :

Digitized by Google

$$\frac{y}{x} = \frac{a}{b} = \frac{a}{L - a}$$

d'où :

$$a = \frac{L\,y}{x + y}$$

$$dx = \frac{y\,L}{\frac{L^2\,y^2}{(x+y)^2}} \times da = \frac{(x+y)^2}{L\,y}\,da \quad (2)$$

On peut se demander si l'essai ne pourrait pas donner des résultats plus précis si on intervertissait les connexions de x et y. Dans ce cas, on aurait :

$$\frac{x}{R + y} = \frac{a}{L - a}$$

$$dx = (R + y)\,\frac{(L - a)\,da + a\,da}{(L - a)^2} = \frac{R + y}{L - a}\,\frac{L}{L - a}\,da.$$

Or : $\frac{R + y}{L - a} = \frac{x}{a}$

On voit que dx sera minimum quand $a\,(L - a)$ sera maximum, donc pour $a = L/2$ ou $a/b = 1$.

Il est évident que si x est plus petit que y, on se rapprochera le plus possible de $a/b = 1$ en faisant $R = o$.

Dans ce cas, on se trouve dans les conditions de l'essai précédent.

Supposons par contre que x soit supérieur à y et que l'on réalise $a/b \backsim 1$. L'équation (3) devient alors :

$$dx = \frac{x\,L}{\frac{L^2}{4}}\,da = \frac{4\,x}{L}\,da \quad (4)$$

Or, l'erreur donnée par (2) est :

$$dx = \frac{(x+y)^2}{L\,y}\,da = \frac{(x-y)^2 + 4\,xy}{L\,y}\,da =$$

$$\left(\frac{(x-y)^2}{L\,y} + \frac{4\,x}{L}\right)da > \frac{4\,x}{L}\,da$$

Digitized by Google

Cette erreur est donc supérieure à celle donnée par (4).

Pour nous rendre compte des erreurs qu'on peut commettre par l'application de notre méthode, reprenons les cas envisagés au commencement de la présente note ; d'abord : $x = 2$ ohms ; $y = 50$ ohms (la valeur de z n'intervient plus).

On aura comme erreur absolue limite :

$$dx = \frac{(x+y)^2}{Ly}\,da = \frac{(52)^2}{L \times 50}\,da.$$

Supposons que, comme précédemment, da vaille 0,01 de la moitié de la résistance à curseur, soit : 0,01 L/2. Nous aurons :

$$dx = \frac{52^2}{L \times 50} \times 0{,}01\,\frac{L}{2} = 0{,}27 \text{ ohm} = 13{,}5\ \%, \text{ soit}$$

plus de quatre fois moins que par la première méthode.

Nous pouvons rendre le fait plus tangible, comme nous l'avons fait plus haut :

Si on ne fait pas d'erreur, on doit lire :

$$\begin{cases} x + y = 52 \\ y/x = 25 \end{cases}$$

Pour une erreur de 1 % sur a, on aura environ, comme nous l'avons vu plus haut, 2 % d'erreur sur $x + y$, la mesure de $x + y$ se faisant avec $a/b \backsim 1$; l'erreur sur $x + y$ sera donc environ de 1 ohm.

Pour y/x, à une erreur de $da = 0{,}01$ L/2 correspondra une erreur, sur y/x, de $\dfrac{\dfrac{d}{da}\left(\dfrac{a}{L-a}\right)}{\dfrac{y}{x}} = 13{,}5\ \%$, soit environ 3,4 ohms, ce qui fait qu'on pourra lire, dans le cas le plus défavorable

Digitized by Google

$$x + y = m = 53 \text{ (au lieu de 52)}$$
$$y/x = n = 21{,}6 \text{ (au lieu de 25)}$$

d'ou $x = \frac{m}{1+n} = 2{,}33$ (au lieu de 2 ohms) soit une erreur de 16,5 %.

Supposons maintenant, comme dans le cas de la première méthode, que $x = 2$ et $y = 3$ ohms.

$$dx = \frac{(x+y)^2}{L\,y}\,da = \frac{(5)^2}{L \times 3} \times 0{,}01\,\frac{L}{2} = 0{,}04 = 2\ \%,$$ soit

13 à 14 fois moins qu'avec la première méthode.

***

Nous n'examinerons pas le cas où $x > y$. Du reste, dans ce cas, l'approximation obtenue par l'emploi de notre méthode serait encore plus grande.

En définitive, on voit que, d'une façon générale :

1) Lorsqu'on a à mesurer une terre de faible résistance et qu'on doit créer deux terres auxiliaires, la méthode ordinaire est très grossière et la nôtre donne des résultats beaucoup plus exacts.

2) Lorsqu'on a à mesurer deux terres de faible résistance et qu'on doit créer une terre auxiliaire, la méthode ordinaire est encore plus grossière et la nôtre donne des résultats très approchés.

Ce n'est guère que lorsqu'on aura à mesurer 3 terres de résistances à peu près comparables qu'on pourra, sans désavantage, recourir à la méthode ordinaire. Dans ce cas, les deux méthodes pourront être utilisées parallèlement, à titre de vérification l'une de l'autre. Bien entendu, dans ce qui précède, nous n'avons envisagé que les erreurs dues au fait que le curseur de la résistance *ab* peut ne pas être placé dans la position exacte correspondant au silence du téléphone. Nous avons évidemment

Digitized by Google

fait abstraction de toutes les causes d'erreur qui sont communes aux deux méthodes, savoir : 1) la polarisation des plaques de terre ; 2) la self-induction des branches du pont ; 3) les courants telluriques ; 4) le fait que, quand il convient de réaliser $a/b = 1$, le conditionnement de la résistance de comparaison R ne permet pas de s'approcher suffisamment de cette condition ; 5) la résistance des fils de connexion, etc.

(N. B. — Les courants telluriques n'auront une certaine influence que si on a des plaques de terre très distantes l'une de l'autre. Quant aux résistances des fils de connexion, on peut, si elles ont des grandeurs suffisantes, les déduire des valeurs obtenues pour les résistances des terres.)

Pour terminer, nous signalerons les avantages que présente notre méthode, outre celui de l'approximation relativement grande :

1) Elle ne nécessite, dans le calcul, que 2 équations dont la résolution est très rapide (surtout quand $R = o$) ;

2) Les manipulations de l'appareil sont beaucoup plus simples : on ne doit faire que deux opérations et deux lectures ; on ne doit pas toucher aux connexions des terres x et y ;

3) La constitution des terres auxiliaires est plus aisée ; il est inutile, en effet, de soigner particulièrement le conditionnement de la terre z, car il faudrait que la résistance de cette terre fût excessivement grande pour qu'elle pût avoir une influence sur la sensibilité de la mesure par le fait d'être en série avec le téléphone.

M. LASSALLE.

Digitized by Google

551.493

Étude physique des eaux de Spa.
Radioactivé, résistivité et point cryoscopique.

Introduction.

Les eaux réputées de Spa se divisent en deux catégories: les premières, riches en fer et en anhydride carbonique, sont prises en boisson ou servent à préparer des bains carbo-gazeux; les autres, non minéralisées, jaillissent dans les hauteurs boisées avoisinant la ville; leur remarquable pureté a consacré leur emploi dans les cures de lavage interne.

Bien que la composition des eaux minérales de Spa fût connue depuis longtemps, une Commission de spécialistes était récemment chargée par le Gouvernement belge de faire l'étude chimique, bactériologique et physique de toutes les sources intéressantes de la région, tant minéralisées que non minéralisées; l'étude physique, dont l'importance est à présent reconnue, en était effectuée au laboratoire de l'Institut Électrotechnique Montefiore. En voici le résultat:

Mesure de la radioactivité des eaux de Spa.

Les corps radioactifs émettent des radiations qui jouissent de la propriété d'impressionner les plaques photographiques et de rendre conducteurs ou d'ioniser les gaz qu'elles traversent.

Les corps radioactifs dégagent spontanément une émanation qui se comporte comme un gaz; cette émanation

Digitized by Google

émet également des radiations jouissant des propriétés précédentes.

L'émanation, enfermée en vase clos, se détruit spontanément suivant une loi logarithmique du temps ; si J_0 représente l'intensité totale des rayons émis au temps o, et J l'intensité au temps t, on a

$$J = J_0 e^{-\lambda t}$$

où e représente la base des logarithmes naturels et λ une constante caractéristique du corps qui a produit l'émanation. Curie avait trouvé pour λ une valeur de 0,173 dans le cas du radium, t étant le temps exprimé en jours ; les récentes expériences de Mme Curie ont conduit à la valeur de 0,180, qui correspond à la disparition de la moitié de l'émanation en 3,85 jours (1) ; cette valeur est actuellement admise universellement.

Les rayons émis par les corps radioactifs communiquent aux corps qu'ils frappent une radioactivité temporaire ; lorsque ces corps sont soustraits à l'action des rayons inducteurs, cette radioactivité disparaît suivant une loi qui dépend de la durée de l'activation et de la nature des radiations utilisées. Lorsque l'activation a eu lieu par du radium dont tous les rayons ont été mis en œuvre pendant un temps suffisant, on constate que la moitié de l'activité induite a disparu 15 minutes après l'enlèvement du corps activant (2).

Lorsque deux électrodes sont placées dans un gaz ionisé par les radiations considérées, on constate que le courant qui passe de l'une à l'autre augmente d'abord avec la tension appliquée, mais qu'il tend ensuite vers

(1) Mme P. Curie : *Traité de radioactivité*, 1910, tome I, page 219.
(2) Ibid. page 331.

Digitized by Google

une valeur limite qui peut être considérée comme constante lorsque la tension appliquée atteint et dépasse une valeur suffisante ; c'est le courant de saturation.

Si on place une substance radioactive sur une électrode et que l'on écarte l'autre progressivement, le courant, pour une même tension, augmente jusqu'à une valeur limite ; il semble que pour cet écartement des électrodes tous les rayons aient été absorbés par l'air interposé et utilisés à l'ioniser ; aussi peut-on dire que le courant de saturation ne dépend pas de la forme de l'appareil employé si les distances entre électrodes sont assez grandes pour que toutes les radiations émises aient été absorbées par l'air interposé.

Le courant de saturation ainsi obtenu ne dépend plus que de l'intensité du rayonnement émis dans l'appareil ; il lui sert de mesure.

L'unité adoptée est le *mache*, millième partie de l'unité électrostatique d'intensité de courant.

Mesure de l'émanation radioactive des eaux de sources.

Les eaux de sources, de même que les gaz qu'elles contiennent, sont généralement chargées, à des degrés divers, d'émanations radioactives.

La mesure de l'émanation des sources ou plutôt du rayonnement qu'elle produit, a été effectuée par la méthode du fontactoscope d'Engler et Sieveking.

L'émanation était extraite de l'eau en agitant pendant une demi-minute un litre de l'eau étudiée dans un bidon fermé de dix litres ; l'émanation se répand dans l'air du bidon et il n'en reste que 2 % environ dans l'eau, quantité dont on tient compte en multipliant le résultat trouvé par 1,02.

Immédiatement après cette opération, on mesure le courant de saturation passant de la paroi du bidon à un

Digitized by Google

disperseur isolé plongeant dans l'air ionisé ; ce disperseur est réuni électriquement aux feuilles d'aluminium d'un électroscope que l'on adapte sur le bidon ; le condensateur formé par le disperseur et les feuilles d'une part, les parois du bidon et de l'électroscope d'autre part, est chargé à une différence de potentiel suffisante pour obtenir le courant de saturation. Celui-ci est déduit de la rapidité de chute des feuilles d'aluminium ; à cet effet, une échelle graduée permet de repérer leur position à tout moment ; le rapport entre la tension appliquée et la déviation a été déterminé préalablement pour toute l'échelle de déviation. Comme le courant de saturation est constant pour un même rayonnement, la chute de tension est constante pour chaque unité de temps et l'on a

$$i = c \frac{V_0 - V}{t}$$

où i désigne le courant de saturation, c la capacité du condensateur, V_0 et V les tensions aux temps o et t. Dans l'appareil utilisé, si V_0 et V étaient exprimés en volts, t en heures et i en maches, on avait

$$i = 0{,}00972 \frac{V_0 - V}{t}.$$

Ce résultat doit subir diverses corrections.

En premier lieu, le courant obtenu doit être diminué du courant de perte observé lorsque l'air n'a pas été ionisé par le rayonnement à mesurer ; chaque essai doit être précédé de la détermination de ce courant de perte qui peut varier dans une notable proportion d'une expérience à l'autre ; afin de se mettre dans les mêmes conditions que dans l'essai avec émanation, on introduit dans le bidon un litre d'eau inerte que l'on agite une demi minute.

En second lieu, comme la mesure dure un temps notable

Digitized by Google

et ne suit donc pas immédiatement l'introduction de l'émanation dans l'appareil, il faut éventuellement déduire du courant observé celui qui est dû à la radioactivité induite par l'émanation sur les parois du bidon. A cet effet, on mesure le courant après avoir vidé et lavé le bidon et avoir remplacé l'eau étudiée par de l'eau inerte ; comme la radioactivité induite se détruit rapidement au début, ainsi qu'on l'a vu plus haut, on doit ramener la valeur de ce dernier courant à ce qu'elle était au moment de l'expérience avec l'eau essayée ; pour y arriver, on peut utiliser les courbes de décroissance qui ont été étudiées par divers expérimentateurs (1) ; la complexité du phénomène ne permet pas d'arriver à une précision bien grande ; aussi est-il préférable d'opérer rapidement, malgré l'augmentation de l'erreur fortuite qui peut en résulter, comme on verra plus loin. Dans les présents essais, la correction a été trouvée négligeable en opérant dans ces conditions.

En troisième lieu, on doit tenir compte de l'émanation restée dans l'eau comme il a été dit ci-dessus.

Enfin, il faut tenir compte de l'émanation qui s'est détruite spontanément depuis la prise de l'échantillon jusqu'au moment de l'essai ; on y arrive facilement, d'après ce qui a été dit plus haut, en multipliant le courant trouvé par $e^{\lambda t''}$ ou en le divisant par $e^{-\lambda t''}$ où t'' représente le nombre de jours écoulés entre la prise et l'essai (2).

Il résulte de ces considérations que, dans les conditions des présents essais, le courant de saturation par lequel on peut définir l'activité de l'émanation contenue dans un litre d'eau de source au moment de la prise sera donné en maches par l'expression

(1) Mme Curie : *Traité de radioactivité*, tome I, page 331.

(2) Une table des valeurs de $e^{-\lambda t}$ se trouve dans le *Traité de radioactivité* de Mme Curie, page 417, tome I.

Digitized by Google

$$I = \frac{1}{v}\left[\frac{V_0 - V}{t} - \frac{V_0 - V'}{t'}\right] \times \frac{c}{1080} \times 1{,}02 \times e^{\lambda t''},$$

où V_0 et V sont les différences de potentiel en volts aux temps *o* et *t* observées dans l'essai avec émanation, V'_0 et V′ les différences de potentiel aux temps *o* et *t′* de l'essai préliminaire d'isolement, *v* le volume d'eau employé, sensiblement égal à 1 litre, *c* la capacité du condensateur en centimètres et 1080 un facteur de réduction des unités employés ; le facteur $c/1080$ vaut, pour l'appareil utilisé, 0,00972.

L'erreur relative limite fortuite se déduit de la formule précédente ; si l'on observe que V est une fonction sensiblement linéaire de la déviation α des feuilles d'aluminium dans la région de l'échelle pratiquement utilisée, cette expression prend la forme :

$$I = \frac{k}{v}\left[\frac{\alpha_0 - \alpha}{t} - \frac{\alpha'_0 - \alpha'}{t'}\right] \times \frac{c}{1080} \times 1{,}02 \times e^{\lambda t''}$$

On peut se tromper dans la mesure de *k*, c'est-à-dire dans l'étalonnage des déviations, dans la mesure du volume d'eau *v* litres employé, dans la mesure de la capacité, dans l'estimation des déviations α_0, α, α'_0 et α', enfin dans l'évaluation de la durée *t* de l'expérience ; toutefois, lorsque la chute des feuilles est lente, cette dernière erreur disparait complètement devant celle de la déviation, que l'on peut du reste majorer légèrement pour en tenir compte ; l'erreur sur le facteur exponentiel, qui ne représente lui-même qu'une correction de quelques pour cent, est négligeable. L'erreur relative limite, somme des erreurs partielles, est dans ces conditions, si l'on admet que les erreurs de lecture des déviations sont égales, c'est-à-dire que $d\alpha_0 = d\alpha = d\alpha_0' = d\alpha'$,

$$\frac{dI}{I} = \frac{dk}{k} + \frac{dv}{v} + \frac{dc}{c} + \frac{2\,d\alpha\,[t + t']}{t'(\alpha_0 - \alpha) - t(\alpha'_0 - \alpha')}.$$

Digitized by Google

On a admis que dk/k et dc/c valaient chacune 1 °/₀ ; que $2\,d\,\alpha$ pouvait être pris égal à 0,15 division et enfin que la mesure du volume d'eau utilisé comportait 5 °/₀ d'erreur lorsqu'elle était effectuée au moyen du trait de repère du bidon et 0,5 °/₀ lorsqu'elle avait pu se faire par pesée à la balance Roberval.

Le transport de l'eau était effectué dans des bouteilles à fermeture au caoutchouc, qui ont donné les meilleurs résultats ; l'eau y était introduite avec les précautions voulues ; au laboratoire, elle était transvasée dans le bidon du fontactoscope par siphonage. Dans le cas de sources gazeuses, l'agitation de l'eau dans le bidon ayant pour effet d'augmenter notablement la pression dans celui-ci, on retirait de l'eau, après l'agitation, par le robinet inférieur, jusqu'à rétablir la pression atmosphérique, ce que l'on constatait par un petit manomètre à eau relié au robinet supérieur du bidon ; de cette façon, on ne perd pas d'émanation. La durée de l'essai variait généralement de 10 à 20 minutes.

Les tableaux des pages 520 à 522 donnent les résultats de ces recherches. On y a ajouté une colonne reproduisant les chiffres obtenus en 1906 par MM. Éric Gerard et F. Fontaine (1) pour une partie de ces sources, avec un fontactoscope analogue au précédent (électroscope Curie) ; une autre colonne renseigne les valeurs obtenues avec le même appareil en 1912. On remarquera qu'elles sont plus faibles que celles qu'on a obtenues avec le fontactoscope utilisé dans les présents essais et construit par MM. Günther et Tegetmeyer. La divergence est surtout sensible avec les sources gazeuses. Elle provient, suivant toute pro-

(1) Éric Gerard et F. Fontaine : *Mesure de la radioactivité des eaux de Spa et des environs.* (Bulletin de l'Association des Ingénieurs électriciens sortis de l'Institut électrotechnique Montefiore), 1906.

Digitized by Google

babilité, de ce que le premier dispositif employé possédait une étanchéité notablement moindre que le second, ce qui permettrait une déperdition d'émanation pendant l'agitation du liquide.

Vérification de la nature de l'émanation des sources.

Les émanations des divers corps radioactifs se différentient nettement par la valeur du coefficient λ de la loi de destruction de l'émanation.

MM. Gerard et Fontaine avaient vérifié, en 1906, que les eaux de la source Prince de Condé et de Chaudfontaine devaient leur radioactivité à l'émanation du radium.

Cette vérification a été reprise, au cours des présents essais, avec l'eau de source Salmon E supérieure. On a rempli quatre flacons au même moment à la source ; l'eau de ces flacons a été essayée après des intervalles de temps croissants ; le rapport des chutes de tension par heure observées à la chute obtenue le premier jour de l'essai doit être égal à $e^{-\lambda t}$; d'où l'on tire la valeur de λ. On a trouvé comme valeur moyenne $\lambda = 0,182$; le coefficient déterminé par Mme Curie étant 0,180, et ceux des autres corps étant très différents, on a bien affaire à l'émanation du radium.

N° du flacon	Date de la prise	Date de l'essai	t en jours	Chute en volts par heure	λ
1	25-VI-12 9^h35	25-VI 9^h7	0	252	—
2	»	27-VI 9^h44	1,266	203	0,171
3	»	28-VI 17^h53	3,076	133	0,207
4	»	29-VI 15^h58	3,993	129	0,168
				moyenne	0,182

Digitized by Google

ESSAIS DE RADIOACTIVITÉ D'EAUX DE SPA.

SOURCE	Date et heure de la prise	Date et heure de l'essai	Chute en volts par heure observée avec l'eau	Chute en volts par heure à vide	i Courant de saturation en maches	di/i Erreur relative limite	Courant de saturation en maches trouvé avec l'électroscope Curie en 1912	Courant de saturation en maches trouvé avec l'électroscope Curie en 1906
I. — Sources non minéralisées.								
La Fraineuse (tube central sous la dalle).	30-VI-13 $9^h45'$	1-VII-13 10^h25	540	18,7	5,94	0,068	2,3 (eau puisée dans le puisard sous la dalle.)	—
Claire Fagne (légèrement gazeuse) .	19-II-13 $10^h42'$	20-II-13 $10^h25'$	75	30	0,52	0,35	—	—
Puisard commun des 4 sources Tête de cheval, Trokay, Henri Mathy, Fagne Jehin	19-II-13 10^h	19-II-13 15^h	453	64	4,66	0,087	—	—
Source captée pour le **Tir de Malchamp**.	2-I-13 $10^h15'$	2-I-13 $15^h40'$	161	68,3	—	0,054	1,46	—
Salmon E supérieure.	31-VII-12 $10^h25'$	31-VII-12 14^h	870	26,5	8,60	0,124	6,70 (moyenne de 5 essais)	—
	22-VIII-12 $9^h25'$	22-VIII-12 $16^h50'$	885	110	8,15	0,110		
	17-IX-12 $9^h45'$	18-IX-12 $11^h50'$	725	105	7,49	0,107		
Salmon E inférieure	18-VII-12 10^h	18-VI-12 $18^h7'$	501,7	21,7	5,05	0,095	3,16	—

Digitized by Google

Saimon B supérieure	27-VIII-12 9^h45	28-VIII-12 11^h	676	113	6,75	0,110	5,32 (moyenne de 2 essais)	—
	17-IX-12 9^h35	17-IX-12 $17^h25'$	780	98	7,17	0,106		
Saimon B inférieure	11-VI-12 10^h45	11-VI-12 $17^h4'$	168	27	1,48	0,137	0,596	—
Puits Saimon abrité (fond)	23-IX-12 11^h	24-IX-12 $16^h3'$	495	90	5,90	0,125	—	—
Eau ayant séjourné dans le **puits Saimon abrité**	27-VIII-12 $9^h40'$	27-VIII-12 $16^h12'$	240	92	1,54	0,175	—	—
Puits Saimon abrité (source jaillissante)	23-IX-12 10^h	24-IX-12 $12^h20'$	540	94	5,42	0,125	—	—
Source Dereppe	17-IV-13 10	18-IV-13 11^h	248	6,5	2,88	0,077	1,96 (moy. de 2 essais)	—
Galerie de Barisart (eau alimentaire).	24-IV-13 $9^h40'$	25-IV-13 $10^h45'$	120	84	0,43	0,304	—	—
Fontaine d'or	23-VIII-12 10^h	24-VIII-12 $21^h14'$	177	114	0,80	0,34	—	1,15
Source près du ruisseau des Artistes . .	6-VIII-12 $9^h40'$	6-VIII-12 $16^h6'$	51	22,5	0,30	0,74	—	—
Ruisseau des Artistes	6-VIII-12 10^h	6-VIII-12 $15'25'$	22,5	16,5	0,06	3,07	—	—

II. — Sources gazeuses.

Source **Delcor**	23-VII-12 10^h	24-VII-12 $12^h7'$	340	28	3,76	0,111	—	—
	6-VIII-12 $9^h45'$	6-VIII-12 $18^h10'$	366	53	3,32	0,113	—	—
Pouhon Pierre-le-Grand	23-VIII-12 $9^h40'$	23-VIII-12 $17^h10'$	300	90	2,41	0,175	1,24 (moy. de 2 essais)	1,48
Prince de Condé I (pied escalier) . .	13-VIII-12 $9^h36'$	14-VIII-12 $12^h10'$	402	112	3,51	0,117	1,92	1,45

Digitized by Google

ESSAIS DE RADIOACTIVITÉ D'EAUX DE SPA

SOURCE	Date et heure de la prise	Date et heure de l'essai	Chute en volts par heure observée avec l'eau	Chute en volts par heure à vide	i Courant de saturation en maches	$di\ i$ Erreur relative limite	Courant de saturation en maches trouvé avec l'électroscope Curie en 1912	Courant de saturation en maches trouvé avec l'électroscope Curie en 1906
Prince de Condé II (mur)	13-VIII-12 $9^h35'$	14-VIII-12 9^h	314	73	2,86	0,117	1,50	—
Sauvenière St-Remacle	16-VII-12 $9^h58'$	16-VII-12 $18^h8'$	257	21	2,48	0,120	—	1,23
	31-VII-12 $11^h5'$	1-VIII-12 $9^h26'$	240	16,5	2,62	0,133	—	—
Sauvenière Grosbeck	31-VII-12 11^h	1-VIII-12 $14^h44'$	303	116	2,28	0,149	—	1,23
Tonnelet	13-VIII-12 $9^h25'$	13-VIII-12 $16^h38'$	405	14	4,08	0,114	—	2,11
Géronstère	23-VII-12 $9^h40'$	23-VII-12 17^h	312	30	2,96	0,109	—	1,51
Géronstère l'enragée	23-VIII-12 $9^h25'$	24-VIII-12 $16^h30'$	287,5	77,5	2,44	0,151	—	1,40
Barisart	23-VII-12 $9^h11'$	24-VII-12 $14^h22'$	256	69	2,32	0,125	—	1,42
Marie-Henriette (tube central)	23-IV-13 $9^h33'$	24-IV-13 $11^h40'$	365	43	3,87	0,066	1,99	2,06 (prise aux bains)
Marie-Henriette (galerie circ. gauche)	23-IV-13 $9^h30'$	24-IV-13 $15^h45'$	338	51	3,57	0,070	1,63	
Marie-Henriette (galerie circulaire droite) (puisée par verres, très trouble)	23-IV-13 $9^h20'$	25-IV-13 16^h15	115	91,5	0,34	0,44	1,39	

Digitized by Google

Émanation radioactive des gaz des sources.

La mesure de la radioactivité des gaz dégagés par les sources Prince de Condé I et Tonnelet a été effectuée par la méthode du fontactoscope d'Engler et Sieveking.

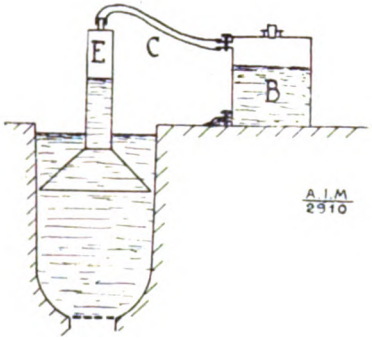


Fig. 1.

Le captage du gaz se faisait (fig. 1) au moyen d'un grand entonnoir E, plein d'eau au début de l'essai, et renversé dans le griffon de la source.

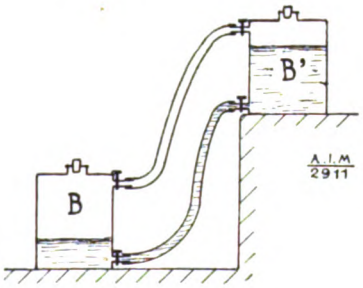


Fig. 2.

Cet entonnoir, clos hermétiquement à la partie supérieure, communiquait par un tube de caoutchouc C avec le robinet supérieur du bidon B, préalablement rempli

Digitized by Google

d'eau inerte. En ouvrant le robinet inférieur du bidon B, l'eau qu'il contenait s'écoulait au fur et à mesure de l'arrivée du gaz qui remplissait peu à peu le bidon et l'entonnoir.

Lors de la mesure des gaz du Tonnelet, on a cherché à éviter la radioactivité induite considérable se formant pendant la longue durée du remplissage, en siphonant rapidement le gaz actif, immédiatement avant l'essai, dans un second bidon identique au premier, B', préalablement rempli d'eau inactive ; la figure 2 représente les liaisons effectuées entre les bidons.

On a dû, dans les deux cas, faire une correction importante pour la radioactivité induite ; pour y arriver, on a multiplié par deux la chute en volts par heure obtenue environ 15 minutes après avoir chassé l'émanation du bidon, l'essai étant terminé (voir p. 514) ; le chiffre obtenu a été adopté comme chute due à la radioactivité induite pendant l'essai ; une erreur importante peut entacher le résultat de ce chef, la loi de destruction de la radioactivité induite dépendant, comme on l'a vu, de facteurs dont il est difficile de tenir compte.

Cette méthode, qui permet également de connaître à peu de chose près le volume de gaz dégagé par la source pendant un temps déterminé, est apte à renseigner sur la quantité totale d'émanation abandonnée par la source à l'air ambiant.

Dans le premier cas (Prince de Condé), le bidon contenait 10 litres de gaz ; dans le second, seulement 9 litres de gaz et 1 litre d'eau, afin de se trouver dans les conditions exactes des précédents essais au point de vue de la capacité électrique de l'appareil.

Le courant de saturation total, mesurant l'activité de toute l'émanation contenue dans le bidon, a été divisé par le nombre de litres de gaz présent, afin de connaître la mesure de l'émanation contenue dans 1 litre de gaz

Digitized by Google

On peut constater que la radioactivité des gaz de ces sources est beaucoup plus marquée que celle de l'eau, pour un même volume.

1. *Prince de Condé I.* — Chute en volts par heure avec le gaz (10 l.) : $(V_0 - V)/t = 6693$.

Chute en volts par heure avant l'essai : $(V'_0 - V')/t' = 19$.

Chute en volts par heure due à la radioactivité induite : *1880*.

Chute due à l'émanation de 10 l. : 6693 — 19 — 1880 = *4794* v/h.

Chute due à l'émanation de 1 l. : 479/10 = *479,4*, soit **4,65** maches.

On a extrait de la source 15 litres environ en 1 h. 15'.

2. *Tonnelet.* — Chute en volts par heure avec 9 litres de gaz : $(V_0 - V)/t = 7967$.

Chute en volts par heure avant l'essai : $(V'_0 - V')/t' = 10$.

Chute en volts par heure due à la radioactivité induite : *1110* v/h.

Chute en volts par heure due à l'émanation de 9 l. : 7967 — 10 — 1110 = *5737*.

Chute due à l'émanation contenue dans 1 l. de gaz : 5737/9 = *637* v/h., soit **6,29** maches.

On a extrait 13 litres de gaz environ en 1 h. 50'.

Radioactivité de l'air à proximité du Pouhon Pierre-le-Grand.

Cet essai n'a décelé aucune radioactivité.

Le bidon, rempli d'eau distillée, a été vidé après avoir été posé à 0^m75 du sol du premier hall du bâtiment du Pouhon, au bord de l'excavation de la source, toutes les portes étant restées fermées depuis longtemps (cet essai a eu lieu en hiver, le 5 décembre 1912). L'isolement de cet air s'est montré parfait ; il a même atteint la plus grande valeur obtenue au cours de tous les essais ; les

Digitized by Google

chutes en volts à l'heure observées ont été respectivement, dans deux essais successifs avec le même air, de 8,6 v/h. et 3,85 v/h.

Radioactivité des roches voisines du point d'émergence et des résidus de sources.

On a essayé successivement des échantillons de terre glaise mêlée de gravier et de roches prélevés dans un puits creusé à proximité de la source Salmon E, de 0^m50 en 0^m50 jusqu'à une profondeur de 3^m50; on a aussi essayé les terres et roches d'un autre puits à proximité, de 2^m50 de profondeur et, enfin, le résidu jaune de la source Salmon.

Ces matières, pulvérisées quand il s'agissait de roches ou de terres sèches, ont été déposées dans le bidon spécial à fond amovible du fontactoscope ou bien sur le plateau inférieur d'un petit condensateur plan d'environ 4 centimètres d'écartement d'armatures, relié à l'électroscope Curie.

Les résultats sont consignés dans le tableau suivant. On peut constater que les chutes en volts à l'heure sont de l'ordre de celles obtenues sans substances ; elles sont parfois plus petites, ce qui provient des variations de l'isolement de l'appareil. On peut déduire de cet essai que ces matières ne présentent aucune radioactivé appréciable.

Cet essai est purement qualificatif.

Digitized by Google

RADIOACTIVITÉ DE ROCHES ET DÉPÔTS DE SOURCES DE SPA

Désignation de la provenance des substances essayées	Appareil employé	Chute en volts à l'heure	
		totale	à vide
Dépôt jaune râclé à l'embouchure du tuyau de Salmon E supérieure . .	Curie (condensateur latéral)	51	55,5
Idem après 6 jours de séjournement sur le plateau du condensateur	id.	40	55,5
Flocons de la source Salmon E supér.	id.	48	75
Idem.	id.	69	75
Puits Salmon abrité (n° I).			
Argile et pierrailles prélevées à 0^m50 de la surface	Curie (bidon)	66,4	57
Id. à 1 mètre de la surface . .	id.	61	57
Id. à 1 m. 50 » » . .	id.	64,6	57
Id. à 2 m. » » . .	id.	54	57
Id. à 2 m. 50 environ (argile séchée	Curie (condensateur latéral)	66	86
Id. à 2 m. 50 de la surface . .	Engler et Sieveking	22,6	16
Roches prélevées à environ 3 m. de la surface et pulvérisées. .	Engler et Sieveking	33	16
Id. id. id.	id.	27	16
Id. à 3 m. 50 de la surface . .	Curie (bidon)	63	57
Puits Salmon n° II.			
Argile et pierrailles prélevées à à 0^m50 de la surface	Curie (bidon)	63	57
Id. à 1 m. de la surface . . .	Engler et Sieveking	27	16
Id. à 1 m. 50 » . . .	Curie (bidon)	53,7	57
Id. à 2 m. » . . .	id.	64,7	57
Id. à 2 m. 50 » . . .	Engler et Sieveking	17,5	16

Digitized by Google

Mesure de la résistivité.

La résistivité des eaux de source est d'autant plus grande que l'eau est moins minéralisée ; sa mesure constitue un excellent moyen de marquer le degré de minéralisation.

La résistivité d'un liquide est la résistance que présente au passage du courant électrique une masse de ce liquide, supposée de forme prismatique, d'une section droite égale à l'unité et d'une longueur égale à l'unité.

La résistance x d'une masse liquide contenue dans un récipient isolant de section constante s et limitée par deux électrodes distantes d'une longueur l, est reliée à la résistivité ρ par la relation

$$x = \rho \frac{l}{s}.$$

On peut donc déduire ρ de la mesure de la résistance x, de la longueur l et de la section s. Toutefois, il est plus commode et plus sûr de rechercher expérimentalement la valeur du coefficient $K = l/s$ relatif au récipient utilisé, en mesurant la résistance x_0 que présente une solution étalon de résistivité connue ρ_0 introduite dans le récipient ; on a alors

$$K = \frac{l}{s} = \frac{x_0}{\rho_0}.$$

Dans les présents essais, la mesure des résistances a été effectuée par le pont de Wheatstone à fil divisé et alimenté par des courants alternatifs ; ce procédé, préconisé par Kohlrausch [1], est devenu d'un emploi presque général pour de telles mesures.

(1) Kohlrausch, Annalen der Physik und Chemie (Wiedeman's), Neue Folge Vol. XI (1880), p. 653 : Einfache Methoden und Instrumente zur Widerstandsmessung insbesondere in Elektrolyten.

Digitized by Google

L'emploi du courant alternatif permet d'éviter les phénomènes d'électrolyse qui modifient la nature du liquide essayé ; le fil divisé permet un réglage rapide et réduit la self-induction et la capacité des branches correspondantes du pont, qui exercent une influence perturbatrice dans la mesure.

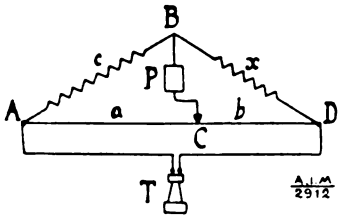


Fig. 3.

Le pont est formé (fig. 3) par la chaîne fermée des résistances x, b, a et c ; $a + b$ a une résistance constante, constituée par le fil divisé en alliage résistant A D ; la diagonale B C comprend l'appareil P produisant une force électromotrice alternative et se termine par un contact mobile C appuyant sur le fil A D et le divisant en deux parties de résistances a et b ; la seconde diagonale renferme le téléphone T.

Lorsque le courant est nul dans la branche du téléphone, c'est-à-dire lorsque celui-ci n'émet plus aucun son, on a la relation

$$x = \frac{b}{a} c$$

d'où l'on déduit x.

En réalité, la self-induction et la capacité des branches du pont ne pouvant être complètement évitées, le courant n'est jamais nul dans le téléphone ; le réglage s'opère en faisant glisser le curseur C jusqu'à obtenir un minimum de son au téléphone.

Digitized by Google

L'appareil utilisé dans les présents essais est un pont de Kohlrausch construit par la maison Hartmann et Braun ; le fil divisé a une longueur de 24,7 cm et une résistance de 4 ohms ; la résistance *c* est formée de bobines de fil d'alliage ; le générateur de courants alternatifs est formé d'un électro-aimant actionnant un interrupteur à trembleur ; le courant envoyé dans le pont est en réalité un courant intermittent auquel se superposent les extra-courants dus à la self-induction de l'électro-aimant ; les quantités d'électricité positives et négatives qui traversent successivement le pont ne sont donc pas égales.

On a employé, dans tous les essais relatés ci-dessous, un élément d'accumulateur de 2 volts environ pour alimenter cet appareil de production de courants alternatifs.

Le récipient en verre contenant le liquide à étudier (fig. 4 ,

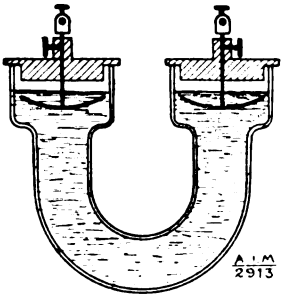


Fig. 4.

qui a été utilisé, a la forme d'un tube de grand diamètre recourbé en forme d'U et terminé par deux coupes évasées où les électrodes plongent. Chaque électrode est formée par une calotte sphérique en platine platiné munie d'une tige de platine serrée dans un couvercle en ébonite ;

Digitized by Google

l'extrémité libre de cette tige porte la borne de fixation du fil de connexion.

Un point capital, dans les essais de résistivité de liquides par la méthode du pont, est d'éviter la formation d'une force électromotrice de polarisation au contact de l'électrode et du liquide. On évite presque totalement ce phénomène en utilisant des électrodes de platine recouvertes d'une couche de platine déposée électrolytiquement. On fait disparaître les dernières traces de polarisation en soumettant ces électrodes pendant une heure à l'action du courant alternatif utilisé, dans une solution d'acide sulfurique très dilué.

Les électrodes employées ont été soigneusement platinées en suivant les prescriptions données par M. Diénert dans son manuel « Eaux douces et minérales », p. 159; les électrodes sont d'abord lavées pendant un temps suffisant successivement dans une solution de potasse, d'acide nitrique au tiers et dans l'eau distillée; on recommence cette série de lavages plusieurs fois ; on plonge ensuite les électrodes dans une solution de 100 grammes d'eau distillée, 3 gr. de chlorure de platine et 0,025 gr. d'acétate de plomb, et on fait passer le courant de l'une à l'autre ; ce courant ne doit pas dépasser une densité de 1 ampère par 20 cm^2; dans le cas actuel, on s'est servi de la coupe décrite ci-dessus pour effectuer ce platinage, et la densité de courant a été beaucoup moindre encore que la limite indiquée ; la tension appliquée ne doit pas dépasser 2 volts ; lorsque l'une des électrodes, celle qui forme cathode, est noircie, on renverse le courant et la seconde électrode se noircit à son tour sans que la couche de platine déposée sur la première en souffre.

La résistivité des électrolytes dépend notablement de la température; il est donc très important de faire la mesure à une température bien déterminée. On adopte

Digitized by Google

généralement 18° C.; cette température a été maintenue constante par un bain d'eau de grand volume où plongeait le tube en U et dans lequel on injectait de l'eau froide ou de la vapeur suivant besoin.

L'échantillon, avant l'essai, restait immergé pendant 20 minutes environ dans le bain extérieur, dont la température était mesurée par un thermomètre gradué au dixième de degré.

La mesure de la résistivité par cette méthode est sujette à diverses erreurs d'observation : la mesure de x est affectée par l'erreur de lecture de la position du contact mobile C et par le manque de sensibilité du téléphone; de plus, le coefficient K, qui est déterminé expérimentalement, est affecté par l'erreur de mesure sur la résistance x_0 et par l'indécision sur la valeur exacte de ρ_0, la résistivité de la solution étalon, qui varie avec la température de celle-ci, que l'on ne connaît pas exactement.

Enfin, une dernière cause d'erreur provient de l'incertitude de la température exacte du liquide à l'étude; il n'a pas été tenu compte de cette erreur dans les chiffres qui suivent, mais il est bon de noter que la température renseignée à côté de chaque essai peut différer de ± 0,2 degré centigrade environ de la température réelle.

Voici comment on peut estimer l'erreur relative limite d'observation sur le résultat cherché ρ. On a

$$\rho = \frac{x}{K}.$$

L'erreur relative sur la résistivité a donc pour expression :

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{dx}{x} + \frac{dK}{K}.$$

1° L'erreur dx/x, qui renferme l'erreur sur la position

Digitized by Google

du curseur et celle du téléphone, peut s'estimer expérimentalement ; en effet,

$$x = \frac{b}{a} c = \mathrm{R} c$$

en désignant par R le rapport b/a directement lu sur la graduation du fil divisé ; d'où

$$\frac{dx}{x} = \frac{d\mathrm{R}}{\mathrm{R}}.$$

On cherche par tâtonnement, à gauche et à droite du point qui semble donner le minimum ou la nullité du son, les deux positions du curseur pour lesquelles on commence à entendre nettement une augmentation du son ; soient R_1 et R_2 les rapports correspondants lus à l'échelle du fil divisée, la plus faible lecture étant légèrement diminuée et la plus forte augmentée pour tenir compte des erreurs de lecture à cette échelle divisée. R_1 et R_2 représentant les valeurs les plus rapprochées pour lesquelles l'équilibre du pont est rompu d'une façon certaine, l'erreur limite sur le rapport R, lequel est pris égal à la moyenne de R_1 et R_2, sera évidemment

$$d\mathrm{R} = \mathrm{R} - \frac{\mathrm{R}_1 + \mathrm{R}_2}{2}.$$

2° L'erreur $\frac{d\mathrm{K}}{\mathrm{K}}$ peut s'estimer comme suit. On a

$$\mathrm{K} = \frac{x_0}{\rho_0};$$

d'où

$$\frac{d\mathrm{K}}{\mathrm{K}} = \frac{dx_0}{x_0} + \frac{d\rho_0}{\rho_0}.$$

dx_0/x_0 s'estime comme il vient d'être dit. $d\rho_0/\rho_0$ provient surtout de ce que l'on peut se tromper sur la tempé-

Digitized by Google

rature de la solution étalon ; l'expérience ayant montré que dans les conditions des présents essais on pouvait se tromper de ± 0,2 C, et la variation de ρ_0 valant 2,18 % par degré C pour la solution utilisée, on voit facilement que

$$\frac{d\,\rho_0}{\rho_0} = 0{,}2 \times 0{,}0218 = 0{,}0044.$$

Afin de rechercher pratiquement les conditions les plus favorables de l'expérience, on a effectué une série d'essais pour chaque liquide en variant dans de grandes limites la résistance c et par conséquent le rapport $R = b/a$. On a trouvé, comme le montre le tableau de chiffres qui suit, que pour les grandes valeurs de la résistance x, b/a doit être relativement grand et s'écarter beaucoup de la valeur 1 que l'on peut démontrer la meilleure lorsque l'on ne tient compte que de l'erreur de lecture du curseur en négligeant l'insensibilité du téléphone.

Les valeurs de b/a montrées comme favorables par les tableaux qui suivent s'écartant beaucoup de l'unité, la discussion mathématique des meilleures conditions de l'expérience a été effectuée. Les résultats concordent avec ceux des essais ; c'est ainsi que pour $x = 80\,000$ ohms, par exemple, le calcul conduit, pour les conditions où l'on se trouvait, à une valeur de 10 environ pour b/a.

Il est intéressant de remarquer, à ce propos, que c'est dans des conditions analogues que Kohlrausch a mesuré les électrolytes de grande résistivité, tels que l'eau distillée et les solutions très diluées [1], non pas dans le but de se mettre dans les meilleures conditions d'essai, mais bien parce que les valeurs de c supérieures à 2 000 ohms

(1) Kohlrausch. Uber das Leitungsvermögen einiger Elektrolyte in aüsserst verdünnter wasseriger Lösung. Annalen der Physik und Chemie (Wiedeman's), Neue Folge, Vol. XXVI (1885) p. 161.

Digitized by Google

dont il se servait présentaient une capacité nuisible ; Kohlrausch disposait d'un appareil spécial avec un long fil divisé enroulé en hélice sur un tambour, qui permettait d'employer des rapports b/a valant 50 avec une précision de lecture du curseur de l'ordre de 1 pour cent.

Les trois récipients utilisés au cours des essais ont été étalonnés au moyen d'une solution de $NaCl$ à 5 % (5 gr. sel et 95 gr. d'eau distillée) pour laquelle $\rho_0 = 15{,}02$ ohm par cm² de section et cm. de longueur, à 18° C., d'après Kohlrausch.

On a d'abord employé du sel vendu comme chimiquement pur par un spécialiste de la ville ; le résultat, pour l'un des récipients, a été contrôlé avec du sel pur gracieusement offert par M. De Koninck, professeur de chimie analytique à l'Université de Liége. Les résultats trouvés ont été respectivement, pour la constante K, de 7,73 et 7,74. La différence est très notablement en dessous de l'erreur limite que comporte chacune des mesures.

Digitized by Google

RÉSISTIVITÉ D'EAUX DE SPA.

N° de l'essai	SOURCE ESSAYÉE	DATE de la prise	DATE de l'essai	c ohms	b/a	Erreur relative limite $d(b/a)/(b/a)$	Température moyenne du bain extérieur Degrés C	Résistivité en ohms-centimètres ρ	Erreur relative limite sur la mesure $d\rho/\rho$
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
	A. — Sources non minéralisées.								
I	**La Fraineuse,** (Eau puisée sous la dalle de pierre recouvrant le 1er puisard).	19 II 1913	20 II 1913	11000	6,00	0,050	18,13	22550	0,057
				12000	4,95	0,050	18,12	20300	0,057
				12000	4,95	0,050	18,13	20300	0,057
	2e échantillon du même flacon.	19 II 1913	20 II 1913	12000	5,10	0,059	18,08	20900	0,066
				12000	5,00	0,060	18,02	20550	0,067
				12000	5,15	0,068	17,84	21100	0,075
	Moyenne						18,05	**20900**	0,063
II	**Claire Fagne.**	19 II 1913	20 II 1913	12000	5,20	0,077	18,0	**21400**	0,084
III	**Salmon E supérieure.**	21 II	22 II	12000	6,8	0,073	18,10	27900	0,080
				23000	3,3	0,091	18,11	25950	0,099
	2e échantillon du même flacon.	21 II	22 II	12000	6,5	0,077	18,10	26600	0,084
				23000	3,45	0,101	18,08	27100	0,108
	Autre prise d'essai.	5 V	5 V	10000	8,0	0,375	18,07	27900	0,383
				8000	10,5	0,333	18,02	29300	0,341
	Moyenne des 4 meilleurs essais						18,10	**26900**	0,098

Digitized by Google

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
IV	**Salmon B supérieure.**	21 II	22 II	12000 23000	5,25 2,60	0,086 0,115	18,19 18,18	21500 20400	0,093 0,122
	2e échantillon du même flacon.	21 II	24 II	12000 23000	5,2 2,75	0,077 0,091	18,04 18,05	21300 21600	0,084 0,098
	Moyenne						18,11	**21200**	0,099
V	**Salmon B inférieure.**	22 IV	22 IV	8000 12000 23000	9,50 6,25 3,65	0,158 0,120 0,288	17,98 17,99 17,95	26500 26100 29300	0,166 0,128 0,296
	Moyenne des 2 premiers essais						17,98	**26300**	0,147
VI	**Source jaillissante dans le puits Salmon abrité** no **I.** Eau laiteuse.	21 II	22 II	12000 23000	11,5 6,05	0,173 0,157	18,09 18,10	47300 47600	0,180 0,164
	2e échantillon du même flacon.	21 II	22 II	12000 23000	11,5 4,65	0,173 0,161	18,01 18,01	47300 36600	0,180 0,168
	Moyenne						18,05	**44700**	0,173
VII	**Source Dereppe.**	20 II	21 II	12000 23000	7,8 3,75	0,077 0,067	18,05 18,02	32000 29500	0,084 0,074
	2e échantillon du même flacon.	20 II	21 II	22000 100000	4,1 1,2	0,073 0,250	17,98 17,86	30900 41000	0,080 0,257
	Moyenne des 3 meilleurs essais						17,98	**30800**	0,079
VIII	**Galerie de Barisart.** (Eau alimentaire.)	21 II	24 II	12000 23000 34000	13,0 6,1 4,25	0,154 0,147 0,176	18,02 18,01 17,97	20000 18900 19400	0,163 0,156 0,185

Digitized by Google

RÉSISTIVITÉ D'EAUX DE SPA. (SUITE).

N° de l'essai	SOURCE ESSAYÉE	DATE de la prise	DATE de l'essai	c ohms	b/a	Erreur relative limite $d(b/a)/(b/a)$	Température moyenne du bain extérieur Degrés C	Résistivité en ohms-centimètres ρ	Erreur relative limite sur la mesure $d\rho/\rho$
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
	Galerie de Barisart. (Eau alimentaire.) *(Suite).*	21 II	24 II	12000	12,0	0,166	18,00	19400	0,175
				23000	6,0	0,166	18,01	18500	0,175
	2e échantillon du même flacon.			34000	4,7	0,170	18,01	21400	0,179
	Moyenne						18,00	**19600**	0,172
IX	**Eau redistillée** dans un alambic de verre le	5 V	5 V	20000	17,25	0,740	17,96	120000	0,748
				20000	12,25	0,634	18,00	85500	0,642
				10000	20,00	0,500	18,02	69600	0,508
	Moyenne des 2 meilleurs essais						18,10	**77500**	0,575
	B. — SOURCES GAZEUSES.								
X	**Delcor.**	20 II	21 II	3000	3,68	0,022	18,09	3770	0,020
				6000	1,875	0,024	18,05	3840	0,031
				12000	0,95	0,042	18,08	3900	0,049
	2e échantillon du même flacon.	20 II	21 II	3000	3,68	0,022	18,05	3780	0,029
				6000	1,835	0,030	18,06	3760	0,037
				12000	0,92	0,044	18,07	3780	0,051
	Moyenne des 4 meilleurs essais						18,06	**3780**	0,031
XI	**Pouhon Pierre-le-Grand.**	18 II	19 II	1000	3,85	0,013	18,05	1315	0,020
				5000	0,775	0,019	17,95	1320	0,026
				9000	0,440	0,027	17,84	1355	0,034

Digitized by Google

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
	2e échantillon du même flacon.	18 II	19 II	1000	3,87	0,013	17,97	1320	0,020
				5000	0,785	0,019	17,91	1340	0,026
				9000	0,435	0,023	17,84	1340	0,030
	Moyenne des 2 meilleurs essais						18,01	**1315**	0,020
XII	**Prince de Condé I** (pied escalier).	18 II	18 II	1000	4,05	0,012	18,05	1380	0,019
				1000	4,07	0,012	18,01	1395	0,019
				1000	4,07	0,012	17,91	1395	0,019
				5035	0,83	0,036	18,00	—	—
				5035	0,815	0,031	18,02	—	—
				5035	0,815	0,031	18,07	—	—
				9000	0,450	0,044	17,95	—	—
	2e échantillon du même flacon.	18 II	19 II	1000	4,04	0,010	18,11	1380	0,017
				5000	0,82	0,024	18,11	1400	0,031
				10000	0,405	0,037	18,11	1385	0,044
	2e prise.	14 V	15 V	1700	2,40	0,021	18,0	1420	0,029
				2000	2,05	0,024	18,0	1430	0,032
	Moyenne des 7 meilleurs essais						18,02	**1400**	0,024
XIII	**Prince de Condé II** (mur).	14 V	14 V	2000	2,485	0,022	17,8	**1735**	0,030
XIV	**Sauvenière St-Remacle**	2 V	2 V	2300	3,01	0,029	18,01	2410	0,037
				2500	2,78	0,030	18,03	2420	0,038
	Moyenne						18,02	**2415**	0,038
XV	**Sauvenière Grosbeck.**	2 V	2 V	2300	3,625	0,035	18,02	2910	0,043
				2700	3,10	0,048	18,00	2910	0,056
	Moyenne						18,01	**2910**	0,05

Digitized by Google

RÉSISTIVITÉ D'EAUX DE SPA. (SUITE).

No de l'essai	SOURCE ESSAYÉE	DATE de la prise	DATE de l'essai	c ohms	b/a	Erreur relative limite $d\,b/a)/(b/a)$	Température moyenne du bain extérieur Degrés C	Résistivité en ohms-centimètres ρ	Erreur relative limite sur la mesure $d\rho/\rho$
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
XVI	**Tonnelet.**	2 V	2 V	2000	7,5	0,067	18,00	5200	0,075
				3600	4,3	0,070	18,01	5380	0,078
	Moyenne						18,00	**5295**	0,077
XVII	**Géronstère** (2 échantillons du même flacon).	22 IV	23 IV	2500	2,67	0,047	17,98	2330	0,055
				2500	2,69	0,047	18,10	2340	0,055
	Moyenne						18,04	**2335**	0,055
XVIII	**Géronstère l'enragée** (puisée par verres)	7 V	7 V	1500	4,20	0,035	18,00	2200	0,043
				2000	3,15	0,047	18,03	2195	0,055
				2000	3,14	0,043	18,00	2185	0,051
				2000	2,54	0,043	18,01	2210	0,051
	Moyenne						18,01	**2198**	0,050
XIX	**Barisart.**	21 II	24 II	7000	4,25	0,059	18,02	4020	0,068
				12000	2,50	0,040	18,08	4040	0,049
				23000	1,31	0,069	18,05	4050	0,078
	2e échantillon du même flacon.	21 II	24 II	7000	4,55	0,055	17,98	4300	0,064
				12000	2,525	0,049	18,01	4080	0,058
				23000	1,295	0,058	18,07	4030	0,067
	Moyenne des 2 meilleurs essais						18,04	**4060**	0,053

Digitized by Google

I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
XX	**Marie-Henriette tube central.**	23 IV	23 IV	3000	4,07	0,08	18,10	**4260**	0,088
XXI	**Marie-Henriette galerie circulaire gauche.**	23 IV	23 IV	3000	4,35	0,08	18,08	**4550**	0,088
XXII	**Marie-Henriette galerie circulaire droite** trouble.	23 IV	23 IV	2000	3,62	0,034	18,08	**2520**	0,042

Digitized by Google

ETALONNAGE DES RÉCIPIENTS UTILISÉS

Récipient	c ohms	b/a	x_0 ohms (mesuré)	x_0 ohms (corrigé pour la température)	dx_0/x_0	K	dK/K
I.	100	0,4435	44,35	44,35	0,0079		
	45	0,9765	43,90	43,94	0,0012		
	10	4,385	43,85	43,95	0,0034		
Moyenne des 2 meilleurs essais				43,87	0,0025	2,91	0,007
II.	120	0,930	111,2	111,5	0,0054		
	100	1,115	111,5	111,8	0,0045		
	70	1,595	111,3	111,6	0,0031		
	40	2,775	111,0	111,0	0,0054		
Moyenne des 4 essais				111,5	0,0046	7,43	0,009
II.	200	0,5645	112,9	112,87	0,008		
	120	0,933	111,96	111,9	0,0054		
	70	1,60	112	111,9	0,0062		
Moyenne des 2 meilleurs essais				111,9	0,0060	7,44	0,010
III.	100	0,434	43,4	43,33	0,007		
	50	0,8635	43,17	43,12	0,004		
	30	1,435	43,05	43,03	0,0035		
Moyenne des 2 meilleurs essais				43,07	0,004	2,87	0,0085

Digitized by Google

Abaissement du point de congélation.

Le degré de minéralisation des eaux peut également être décelé par l'abaissement du point de congélation relativement à celui de l'eau distillée.

Cet abaissement a été recherché au moyen de l'appareil de Beckmann, fig. 5 (1).

Le liquide à essayer est contenu dans une éprouvette E fermée par un bouchon traversé par un thermomètre T et munie d'une tubulure latérale *t*; ce thermomètre, qui plonge dans le liquide, est divisé en centièmes de degré.

Le liquide est constamment remué par un agitateur A composé de deux anneaux en tôle de platine ondulée réunis par deux fils de platine à une bague de fer doux émaillé *a*; celle-ci est attirée rythmiquement par un électro-aimant *e* dont les pièces polaires étreignent l'éprouvette ; le courant d'une pile P est envoyé périodiquement dans l'électro-aimant grâce au contact C provoqué entre une vis et un ressort par le choc de la boule du pendule d'un métronome.

L'éprouvette E est fixée par un anneau de caoutchouc dans une deuxième éprouvette M qui forme autour de la première une enveloppe d'air destinée à retarder les échanges de température.

L'ensemble est plongé dans un bain refrigérant B dont la température est maintenue constante et évaluée par un thermomètre.

Pour effectuer la mesure du point de congélation d'un liquide, on introduit environ 22 centimètres cubes de celui-ci dans l'éprouvette, de manière à ce qu'il dépasse légèrement l'extrémité supérieure de la cuvette du thermomètre ; on refroidit ce liquide, par le bain B, légère-

(1) Beckmann : *Zeitschrift für physikalische Chemie*, t. 44 (1903), p. 169.

Digitized by Google

ment en-dessous du point cryoscopique à mesurer et l'on provoque sa congélation en y injectant par la tubulure *t* un petit cristal de glace ; celui-ci est obtenu par congé-

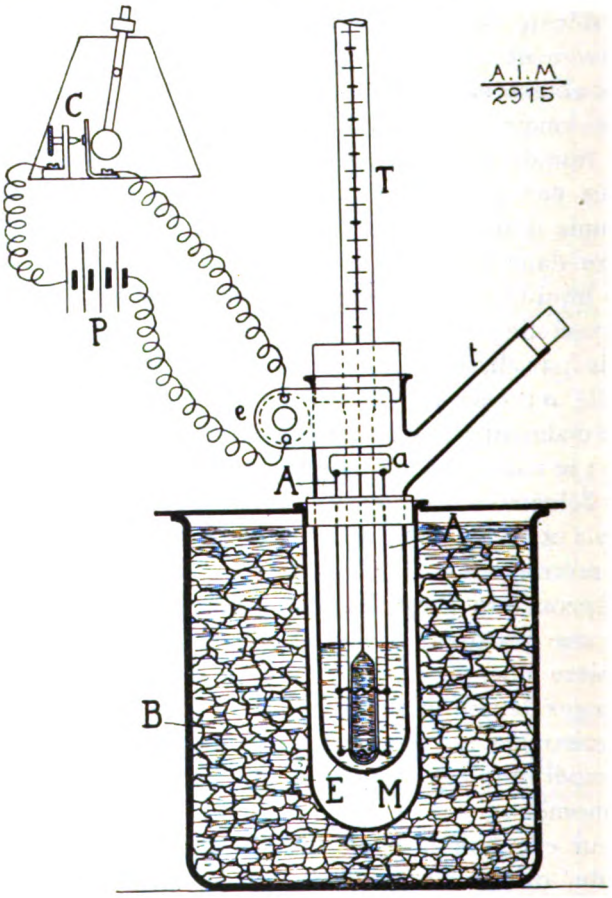


Fig. 5.

lation dans un bain relativement froid d'une autre portion du liquide à l'étude. La formation des cristaux de glace provoquée par cette injection réchauffe l'échantillon jus-

Digitized by Google

qu'à la température de congélation cherchée et l'y maintient pendant un certain temps. La lecture de celle-ci peut alors facilement se faire au millième de degré.

Cette mesure est sujette à de multiples erreurs systématiques, qu'il convient de réduire le plus possible (1).

L'une d'elles provient des échanges de température entre l'échantillon essayé et le bain réfrigérant extérieur. Nernst et Abegg ont montré (2) que cette erreur (nombre de degrés qu'il faudrait ajouter à la température observée pour avoir la température vraie) est proportionnelle à la différence des températures de congélation et du bain réfrigérant, proportionnelle à la rapidité avec laquelle tend à s'établir l'équilibre de température entre le liquide essayé et le bain, et inversement proportionnelle à la rapidité d'échange de température entre les cristaux formés dans l'échantillon et celui-ci. On réduit cette erreur en ne tolérant qu'une différence de un demi degré C. au plus entre le point de congélation et le bain réfrigérant, en enveloppant l'éprouvette d'un matelas d'air retardant les échanges extérieurs et en adoptant une agitation suffisamment vive du liquide essayé.

D'autres causes d'erreurs résident dans la production de chaleur par l'agitation de l'échantillon, dans la division plus ou moins fine des cristaux de glace formés et qui dépend de la rapidité d'agitation et, enfin, dans les variations de pression barométrique ou même hydrostatique du liquide de l'éprouvette, les actions mécaniques se faisant vivement sentir sur la cuvette d'un thermomètre assez sensible que pour donner le centième et même le millième de degré. On élimine autant que possible ces diverses erreurs en faisant immédiatement avant ou après

(1) Voir Beckmann, mémoire cité.

(2) *Zeitschrift für physikalische Chemie*, t. 15 (1894), p. 681.

Digitized by Google

l'essai du liquide étudié un autre essai, dans des conditions aussi rigoureusement semblables qu'il est possible, avec de l'eau distillée parfaitement pure ; l'abaissement du point de congélation cherché s'obtient alors par la différence de deux lectures et les erreurs constantes se trouvent ainsi éliminées.

Les présents essais ont été faits au début en employant de l'eau distillée du commerce ; une différence de quelques millièmes de degré ayant été constatée entre les points cryoscopiques de deux bidons d'origines différentes, il a été reconnu nécessaire de redistiller cette eau au moment de l'essai. La plus grande certitude eût été obtenue en employant un alambic de platine ; mais le prix élevé de ces appareils, hors de proportion avec l'avantage qu'on pouvait en espérer, a fait rejeter cette solution et adopter le dispositif suivant (fig. 6) : un alambic A en verre d'Iéna,

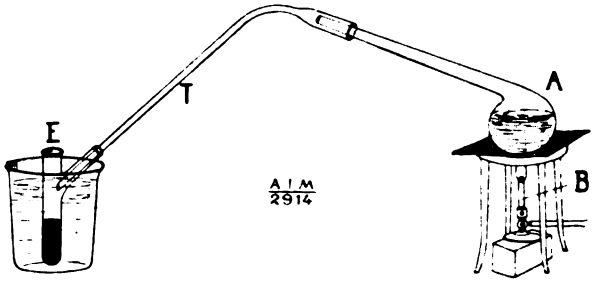


Fig. 6.

chauffé par un brûleur Bunsen B, était incliné de façon que son bec fût relevé sous un angle assez accentué ; de cette façon, les gouttelettes d'eau que pouvait entraîner la vapeur retombaient en majeure partie dans le liquide en ébullition ; l'extrémité de ce bec s'emboîtait dans l'ouverture élargie d'un tube T en verre d'Iéna recourbé vers le bas ; l'autre bout de ce tube était introduit directement

Digitized by Google

dans la tubulure latérale de l'éprouvette E de l'appareil de Beckmann, que l'on pouvait plonger dans l'eau pour activer la condensation ; ce dispositif ne présentait aucun joint en caoutchouc ni aucun bouchon dont la présence eût pu faire suspecter la pureté de l'eau obtenue. Enfin, les premières portions d'eau condensée étaient rejetées, afin d'éliminer les impuretés ou les gouttes d'eau provenant du nettoyage de l'appareil distillateur. L'essai cryoscopique de l'eau de condensation obtenue avait lieu immédiatement après la distillation.

Dans un autre ordre d'idées, une erreur de l'essai cryoscopique consiste dans l'augmentation de concentration de la solution à l'étude provoquée par la formation des cristaux de glace, qui diminue la masse du dissolvant. Le volume d'eau qui se cristallise est tel que la chaleur de solidification qu'il abandonne est égale à la quantité de chaleur nécessaire pour réchauffer la masse jusqu'à la température de congélation. Ce volume solidifié sera donc d'autant plus faible que la cristallisation commencera à une température plus proche du point de congélation cherché. Pour les solutions aqueuses, l'augmentation de la concentration est de 1/80 par degré de différence entre ces deux températures. Pratiquement, la température à laquelle commence la cristallisation n'est pas forcément celle du bain extérieur, vu la lenteur des échanges amenée par l'emploi de l'enveloppe d'air ; souvent on refroidit l'échantillon dans un bain relativement froid avant de le plonger dans le bain définitif, ce qui raccourcit les opérations.

Bien que le thermomètre de l'appareil employé permette des lectures au millième de degré, les diverses causes d'erreur signalées ci-dessus n'autorisent pas, d'après Beckmann [1], à admettre une précision plus grande que

(1) Beckmann : Mémoire cité, p. 181.

Digitized by Google

le demi-centième ou même le centième de degré. Et, de fait, il suffit de comparer les résultats obtenus par divers expérimentateurs pour la même source pour vérifier le fait et constater des différences de deux centièmes de degré (1).

Toutefois, comme dans les présents essais, les abaissements des températures de congélation ont été très faibles et que l'on a pu se mettre ainsi dans des conditions favorables, il est très probable, comme le montre du reste la constance relative des résultats, que l'erreur systématique absolue est notablement inférieure à la valeur d'un demi-centième de degré qu'indique Beckmann.

Il suit de ces considérations que si c'est l'abaissement du point cryoscopique qui constitue l'objectif de l'essai, l'erreur relative limite que comporte le résultat peut devenir considérable lorsque cet abaissement n'est pas très grand, ce qui est le cas de la plupart des sources étudiées ci-dessous.

D'autres causes, non pas d'erreurs, mais bien de différences dans les résultats obtenus, proviennent de la façon de capter l'échantillon, du temps qui s'écoule entre le moment de cette prise et celui de l'essai, de la durée du séjour de l'eau dans des bidons en verre qui s'y dissolvent à la longue. C'est pourquoi il est nécessaire de spécifier les conditions dans lesquelles l'essai a été effectué.

Lorsqu'on essaie des sources gazeuses, comme le Pouhon par exemple, une autre difficulté se présente : l'agitation constante du liquide provoque le départ progressif du gaz dissout dans l'eau ; il en résulte une modification progressive du point de congélation, liée à cet appauvrissement et aux modifications chimiques qui en

(1) Voir Francina : *Contribution à l'étude physique des eaux minérales* (thèse pour le doctorat en médecine). Paris, Maloine, 1906.

Digitized by Google

résultent. On constate que si l'on recommence l'opération un nombre suffisant de fois avec le même échantillon, la température de congélation du liquide monte et tend vers une limite relativement bien définie, à peu près atteinte au moment où l'on constate un léger trouble dans la masse. Hintz et Grünhut [1] ont proposé de ne considérer que ce point, qu'ils appellent « point de congélation stationnaire », afin d'avoir des résultats comparables.

(1) HINTZ et GRÜNHUT : *Chemische u. Physikalisch-Chemische Untersuchung der Lindenquelle zu Birresborn i. d. Eifel.* Wiesbaden, Kreidels Verlag, 1906.

Digitized by Google

ABAISSEMENT DU POINT CRYOSCOPIQUE D'EAUX DE SPA

	DATE DE L'ESSAI	EAU ESSAYÉE	Température du bain en degrés C.	Température de l'échantillon au moment de l'injection du cristal de glace. Deg. C.	Température de congélation de l'échantillon. Degrés C.	Abaissement du point de congélation. Degrés C.	OBSERVATIONS
	I	II	III	IV	V	VI	VII
		A. — EAUX GAZEUSES.					
I	31-XII-1912	Eau distillée.	—0,6	—0,32	+0,030	—	Avant l'essai.
		»	—0,3	—0,21	+0,023	—	Après l'essai.
		Moyenne.	—	—	+0,027	—	
	31-XII-1912	**Pouhon Pierre-le-Grand** (puisé le 30 déc. 1912).	—1,1	—1,0	—0,065	—0,092	1er échantillon. Les 9 premiers essais ont été faits sans enveloppe d'air.
			—1,1	—1,07	—0,050	—0,077	
			—1,1	—0,4	—0,040	—0,067	
			—1,0	—0,85	—0,030	—0,057	
			—0,9	—0,70	—0,024	—0,051	
			—1,1	—0,85	—0,022	—0,049	
			—0,9	—0,80	—0,019	—0,046	Apparition d'une légère buée.
			—0,9	—0,82	—0,015	—0,042	
			—0,8	—0,77	—0,015	—0,042	
			—0,5	—0,22	—0,010	—0,037	Enveloppe d'air.
			—0,4	—0,17	—0,010	—0,037	»
	26-III-1913	**Pouhon Pierre-le-Grand** (puisé le 25 mars 1913).	—0,50	—0,23	—0,084	—0,112	2e échantillon.
			—0,50	—0,30	—0,064	—0,092	
			—0,40	—0,34	—0,058	—0,086	
			—0,35	—0,34	—0,048	—0,076	Interruption de l'essai pendant 1 1/4 h.
			—0,30	—0,20	—0,050	—0,078	
			—0,35	—0,35	—0,038	—0,066	
			—0,30	—0,18	—0,047	—0,075	Emploi d'une nouvelle enveloppe d'air, la 1re
			—0,30	—0,18	—0,040	—0,068	

Digitized by Google

I	II	III	IV	V	VI	VII
		−0,30	−0,23	−0,035	−0,063	étant brisée ; agitation un peu plus énergique de l'échantillon. Un léger trouble semble apparaître à partir du 11e essai.
		−0,45	−0,40	−0,028	−0,056	
		−0,40	−0,30	−0,023	−0,051	
		−0,35	−0,20	−0,024	−0,052	
		−0,35	−0,17	−0,023	−0,051	
		−0,35	−0,33	−0,022	−0,050	
	26-III-1913	Eau redistillée.	−0,35	−0,27	+0,028	

B. — Eaux non minéralisées.

II	2-I-1913	**Salmon E supérieure** (puisée le 2 à 10 h. 25).	−0,15	−0,23	+0,031	0	1r échant. du même flacon.
			−0,35	−0,52	+0,031		2e échant. du même flacon.
		Eau distillée.	−0,35	−0,45	+0,031		1r échant. du même bidon.
			−0,35	−0,52	+0,031		2e échant. du même bidon.
	6-V-1913 à 11 heures	**Salmon E supérieure** (puisée le 5 mai à 9 h. 45).	−0,35	−0,19	+0,027	0	
	12 h. 25	Eau redistillée.	−0,45	−0,22	+0,027		
III	2-I-1913	**Salmon B supérieure** (puisée le 2 à 11 h.	−0,35	−0,44	+0,028	−0,0025	2 échantillons du même flacon.
			−0,45	−0,60	+0,029		
	2-I-1913	Eau distillée.	−0,35	−0,53	+0,031		
	22-III-1913	**Salmon B supérieure** (puisée le 14 mars)	−0,30	−0,19	+0,025	−0,006	Eau floculée.
	22-III-1913	Eau redistillée.	−0,35	−0,23	+0,031		
IV	6-V-1913	**Salmon B inférieure** (puisée le 5 mai à 9 h. 50.	−0,40	−0,24	+0,027	0	
	6-V-1913	Eau redistillée.	−0,45	−0,22	+0,027		

Digitized by Google

ABAISSEMENT DU POINT CRYOSCOPIQUE D'EAUX DE SPA (SUITE).

	DATE DE L'ESSAI I	EAU ESSAYÉE II	Température du bain en degrés C. III	Température de l'échantillon au moment de l'injection du cristal de glace. Deg. C. IV	Température de congélation de l'échantillon. Degrés C. V	Abaissement du point de congélation. Degrés C. VI	OBSERVATIONS VII
V	18-IV-1913	Source **Dereppe** (puisée le 17 avril à 10 h.)	—0,55 —0,55	—0,43 —0,29	+0,035 +0,033	—0,0025	2 échantillons du même flacon.
	18-IV-1913	Eau redistillée.	—0,4 —0,45	—0,27 —0,26	+0,037 +0,036		2 échantillons différents
VI	3-I-1913	Source captée pour **l'eau alimentaire** de Spa (**galerie de Barisart**) puisée le 3 janvier.	—0,35 —0,45	—0,54 —0,63	+0,030 +0,030	—0,003	2 échantillons du même flacon.
		Eau distillée.	—0,35	—1,0	+0,033		
VII	6-V-1913	Source jaillissante du puits abrité creusé près de Salmon E (puisée le 5 mai).	—0,35	—0,20	+0,027	0	Eau laiteuse.
	6-V-1913	Eau redistillée.	—0,45	—0,22	+0,027		

Digitized by Google

Conclusions.

Le tableau suivant récapitule les résultats de l'étude physique des eaux de Spa :

NOM DE LA SOURCE.	Radioactivité. Maches.	Erreur limite.	Résistivité à 18° ohms : cm.	Erreur limite	Point cryoscopique. Degrés C.
Sources ferrugineuses.					
Pouhon Pierre-le-Grand	2,41	0,175	1315	0,020	—0,043
Prince de Condé I	3,51	0,117	1400	0,024	—
Prince de Condé II	2,86	0,117	1735	0,030	—
Sauvenière Saint-Remacle	2,48	0,125	2415	0,038	—
Sauvenière Grosbeck	2.28	0,149	2910	0,050	—
Tonnelet	4,08	0,114	5295	0,077	—
Géronstère	2,96	0,109	2335	0,055	—
Géronstère l'enragée	2,44	0,151	2198	0,050	—
Barisart	2,32	0,125	4060	0,053	—
Marie-Henriette (tube central)	3,87	0,066	4260	0,088	—
Marie-Henriette (gauche)	2,57	0,070	4550	0,088	—
Marie-Henriette (droite)	0,34	0,44	2520	0,042	—
Delcor	3,54	0,112	3780	0,031	—
Sources non minéralisées.					
La Fraineuse	5,94	0,038	20900	0,063	—
Claire-Fagne	0.52	0,35	21400	0,084	—
Salmon E supérieure	8,08	0,114	26900	0,098	0
Salmon E inférieure	5,02	0,095	—	—	—
Salmon B supérieure	6,96	0,108	21200	0,090	—0,004
Salmon B inférieure	1,48	0,137	26300	0,147	0
Puits Salmon (source)	5,42	0,125	44700	0,173	0
Dereppe	2,88	0.077	30800	0,079	—0,0025
Eau alimentaire de Spa	0,43	0,304	19600	0.172	—0,003

Sources ferrugineuses. — On peut conclure de l'étude précédente que toutes les sources minérales de Spa possèdent une notable radioactivité ; on constate toutefois que celle-ci ne vaut, en moyenne, que la moitié environ

Digitized by Google

de celle des eaux non minéralisées ; mais, si l'on étudie les gaz qu'elles déversent en abondance dans l'air environnant, on constate que ceux-ci possèdent une radioactivité marquée.

Les sources minérales montrent une résistivité relativement faible, conséquence de leur forte minéralisation ; la plus petite est celle du célèbre Pouhon Pierre-le-Grand, dont les qualités exceptionnelles ont été reconnues de temps immémorial.

L'essai cryoscopique effectué avec l'eau de cette source confirme ce résultat.

Sources non minéralisées. — Celles-ci manifestent une plus grande radioactivité, sous forme d'émanation dissoute dans l'eau, que les sources minérales. L'essai de résistivité donne des chiffres de l'ordre de celui que fournit la même méthode avec de l'eau distillée dans un alambic en verre (environ 80 000 ohms-centimètre), ce qui montre l'extrême pureté de ces sources.

L'essai cryoscopique permet également de conclure que les sources non minéralisées de la région de Spa ne diffèrent pas sensiblement de l'eau distillée obtenue dans un alambic en verre.

ERIC GERARD et HERMANN CHAUVIN.

Digitized by Google

BIBLIOGRAPHIE

(621.311.0.048) **Théorie et Calcul des phénomènes électriques de transition et des oscillations**, par Charles-Proteus STEINMETZ, traduit de l'anglais par P. BUNET. — Paris, Dunod et Pinat, 1912.

Le livre que M. Steinmetz nous présente sous ce titre complète d'heureuse façon son traité *Théorie et Calcul des phénomènes des courants alternatifs,* dont l'éloge n'est plus à faire. Le nouvel ouvrage souffre avec avantage la comparaison sous le rapport de la valeur technique avec son devancier et on peut dire qu'il le dépasse en intérêt, grâce à la nature particulièrement neuve de la matière traitée. M. Steinmetz nous entretient en effet uniquement, au cours de près de 600 pages, des périodes variables qui séparent deux régimes électriques ou magnétiques successifs et des variations graduelles des quantités électriques avec les points où on les considère. Bien des questions de ce genre qui n'eurent longtemps qu'un intérêt relatif, plutôt scientifique, réclament impérieusement à l'heure actuelle l'attention du technicien. Les états de déséquilibre ont, en vérité, une durée pratiquement très courte, néanmoins ils se manifestent fréquemment par des phénomènes d'une telle ampleur et dont les effets sont si puissants, qu'ils justifient pleinement une étude approfondie mettant en lumière leur mécanisme quelque peu mystérieux.

On devine que ce n'est pas là tâche aisée. Il fallait pour la mener à bien un électricien doublé d'un mathématicien

Digitized by Google

consommé. M. Steinmetz était notoirement connu à ce double titre ; sa réputation ne pourra qu'être rehaussée par son récent ouvrage, qui n'est rien moins que magistral et qui fera époque dans la technique électrique.

Dans tout son livre, l'auteur, trouvant un champ propice à l'utilisation de la science à laquelle il excelle, sème des équations qui communiqueraient une impression froide, plutôt répulsive, à tout qui, non averti, feuilletterait superficiellement ; mais une lecture attentive ne tarde pas à y substituer un sentiment favorable et un intérêt réel. M. Steinmetz est parvenu à rendre des développements mathématiques attrayants grâce à l'habileté qu'ils révèlent, à la simplicité et l'ordre sous lesquels ils sont présentés, grâce aussi à l'unité et à la personnalité remarquables des méthodes mises en œuvre. C'est à tort qu'on croirait le livre à la portée seulement des gens initiés aux hautes spéculations des sciences exactes. L'examen de la plupart des questions, traitées par le procédé analytique simple, est accessible à ceux qui possèdent une connaissance modérée et saine du calcul infinitésimal. Dans la troisième section, il est largement fait usage du calcul symbolique qui a contribué à illustrer le nom du professeur Steinmetz.

Parmi la multitude des phénomènes de transition qui tenteraient un analyste éminent, l'auteur a choisi, pour servir d'élément à son œuvre, ceux qui ont un intérêt prépondérant pour l'industrie électrique. Il s'en trouve nécessairement qui furent examinés par d'autres auparavant et auxquels l'auteur fait peau neuve avec beaucoup de maîtrise.

Les uns et les autres sont soumis à une analyse très complète, très précise, où l'auteur a toujours soin de justifier les hypothèses admises, de légitimer les simplifications introduites au cours du calcul, et qu'il fait suivre de conclusions et de commentaires abondants présentés dans un style concis et clair qui frappe l'esprit.

Digitized by Google

Chaque fois que le processus du phénomène n'apparaît pas clairement — le cas est fréquent — il ouvre le chapitre par une dissertation physique où, sans le secours du calcul, il interprète les observations que permettent l'expérience et l'exploitation. Enfin l'auteur n'a pas négligé d'adjoindre à la théorie de nombreux exemples numériques où l'on rencontre des chiffres éloquents et de multiples graphiques qui fournissent à eux seuls une documentation rapide et satisfaisante.

L'ouvrage est divisé en quatre sections.

La première a trait aux phénomènes transitoires dans le temps qui procèdent à l'ajustement en chaque point des nouvelles conditions d'équilibre quand une perturbation a atteint le système.

Les constantes du circuit électrique font la matière du premier chapitre. Les formules bien connues sur la résistance, la self-induction, la capacité et l'induction magnétique y sont accompagnées de données numériques utiles.

La question du terme transitoire est abordée au chapitre II par la considération de quelques cas familiers. On étudie alors les ruptures de régime dans les circuits continus avec résistance et self-induction : l'établissement d'un circuit de lumière, la fermeture de l'excitation d'un moteur continu, le freinage d'un moteur shunt déconnecté dont on maintient l'armature fermée sur l'inducteur, l'auto-excitation d'un générateur shunt et d'un moteur série donnent lieu à des constatations intéressantes d'ordre pratique. On y apprend, par exemple, qu'un grand générateur exige parfois 3 à 4 minutes pour s'exciter.

Le branchement d'un circuit inductif à une source de courants alternatifs est mentionné ensuite. On y montre que l'allure du courant dans les premiers instants est en

Digitized by Google

relation avec le moment de la période auquel on ferme le circuit.

La charge et la décharge — logarithmiques et oscillatoires — d'un condensateur sont exposées amplement et avec originalité.

La génération des courants oscillatoires suscite des observations et des calculs d'un très grand profit sur les combinaisons de capacités et de bobines de self. L'assimilation d'un câble souterrain au générateur de courants oscillatoires n'est pas oubliée.

Considérant le cas des lignes industrielles à courants alternatifs, possédant résistance, inductance et capacité, l'auteur recherche les différentes allures qu'affecte le courant de départ suivant les valeurs relatives des quantités susdites.

Les vagues de basse fréquence de caractère destructif que provoque sur les réseaux à haut voltage tout changement de conditions sont soumises à une étude fouillée qui met en évidence le danger de l'ouverture sous charge d'un tel réseau et surtout de la rupture d'un court-circuit.

Le chapitre IX sur les circuits divisés fait ressortir l'influence exercée sur les périodes variables d'un circuit peu inductif par un shunt de grande constante de temps, influence précieuse dans bien des cas, en particulier pour combattre l'excès de résistance au départ des organes faisant partie d'un mécanisme de réglage électromagnétique. Y est aussi signalé le circuit inductif à courant continu shunté partiellement par une capacité que l'on reconnaît capable, sous certaines conditions, de régulariser le courant dans la portion shuntée, quand l' ensemble est soumis à une force électro-motrice pulsatoire.

La théorie de l'induction mutuelle est mise à contribution pour résoudre une application numérique intéressante qui a trait à l'hypercompoundage d'un générateur

Digitized by Google

à courant continu de forte puissance soumis à de brusques variations de charge et qui montre que l'accomodation du voltage ne se fait guère instantanément. L'auteur insiste sur la supériorité des pôles feuilletés relativement aux pôles pleins pour les machines de ce genre ainsi que pour les sur- et sous-volteurs.

Après l'exposé de la recherche des équations de période variable dans un système général de circuits, on arrive à l'examen de la saturation magnétique et de l'hystérésis en courants alternatifs, et on reconnaît leur intervention néfaste dans l'élévation parfois si considérable du courant de départ des transformateurs.

Le chapitre XIII, consacré au terme transitoire qui accompagne l'établissement du champ tournant créé par la combinaison de plusieurs champs alternatifs fait apparaître la nature oscillatoire — malgré l'absence de capacité — de cette composante et son indépendance d'avec l'instant de la période d'origine auquel on effectue le raccordement.

Les surintensités constatées aux premiers moments de la mise en court-circuit des alternateurs reçoivent une interprétation claire basée sur l'étouffement passager de la réactance de réaction d'induit réduisant la réactance totale de l'induit à celle de self induction.

La seconde section s'occupe des phénomènes transitoires périodiques, qui sont à envisager lorsque le changement de régime se reproduit à intervalles égaux avec une période de récurrence suffisamment faible pour que le terme transitoire dans le temps d'une rupture déterminée ne soit pas pratiquement éteint quand se fait la modification de conditions suivante. C'est ce qui se passe dans les systèmes oscillants de réglage des circuits électriques, dans la production des courants à haute

Digitized by Google

fréquence, et dans le redressement des courants alternatifs, tous sujets d'intérêt immédiat pour l'électrotechnique. Un exemple relatif au régulateur automatique de tension Tirrill est traité, puis l'auteur développe le redressement mécanique monophasé à intensité constante et à potentiel constant, le redressement biphasé à intensité constante, et accorde un long chapitre illustré d'oscillogrammes au redressement par l'arc à mercure.

Vient alors la 3e section se rapportant aux phénomènes transitoires dans l'espace qui se traduisent par des conditions électriques différant au même instant d'un point à l'autre de l'espace. Leur étude vise donc à l'obtention des relations qui unissent les quantités électriques propres à deux points quelconques du système.

Sont tributaires de cette classe :

la répartition du courant et du voltage sur une ligne de transmission de courants alternatifs à longue distance envisagée dans plusieurs cas spéciaux, parmi lesquels celui de la ligne quart d'onde ;

la recherche de la période naturelle d'une telle ligne ;

l'effet de capacité distribuée sur les bobines de transformateurs à haut potentiel ;

la capacité distribuée en série, comme dans les parafoudres à rouleaux multiples et probablement aussi dans les nuages où ne peut vraisemblablement exister de différence de potentiel suffisante pour déterminer les étincelles de plusieurs kilomètres que constituent les éclairs ;

la distribution du flux magnétique alternatif dans un corps feuilleté, les tôles de fer en particulier, traduite par des équations de l'induction en fonction de la distance de même forme que celles obtenues pour le courant et le voltage au premier chapitre de cette section ;

la distribution de la densité de courant alternatif, que

Digitized by Google

l'on sait très inégale dans les gros conducteurs, tels que les rails de retour en traction monophasée, ou quand il s'agit de fréquence élevée comme celle des décharges de foudre. Le calcul appliqué à un conducteur plat massif conduit aux mêmes équations que celles signalées ci-dessus pour l'induction magnétique. Un appendice est inspiré par la répartition irrégulière du courant continu dans un conducteur de forte section au moment de l'application ou de la suppression de la tension, et en général d'une variation due à une cause quelconque de ce courant, fait de portée apparemment accessoire, mais qui retient l'attention de l'exploitant de tramways par l'augmentation notable de la résistance effective du rail de retour qu'il entraîne. Il s'agit, en réalité, d'un phénomène qui appartient à la section suivante de l'ouvrage et que sa relation étroite avec le sujet précédent a fait ranger ici.

A noter que les deux derniers chapitres supposent, pour rendre possible l'application de l'analyse, la perméabilité constante dans la section, ce qui, fait remarquer le traducteur, n'est pas préjudiciable à la justesse des résultats, dans les limites des inductions usitées ;

les caractères spéciaux apportés aux systèmes par la vitesse de propagation du champ électrique, dont on ne tient habituellement pas compte ; mais qui, par suite de sa valeur finie quoique très grande, dépasse le champ électrique sur le courant d'une façon appréciable dans les régions du champ d'une antenne télégraphique suffisamment éloignées de celle-ci et même en des points de l'espace limité par les deux conducteurs d'un circuit, pourvu que ce dernier soit de fréquence extrêmement élevée. Il s'ensuit une composante en phase avec le courant de la force électromotrice consommée par le champ magnétique et par conséquent une radiation

Digitized by Google

d'énergie dans le milieu environnant. Signalons aussi le symbole nouveau sil. ax par lequel M. Steinmetz désigne la fonction singulière

$$\int_x^\infty \frac{\cos ax}{x} dx$$

entrant dans l'expression du flux magnétique entourant un conducteur isolé de la distance x à l'infini. Un parallèle entre les constantes de conducteurs pour basse et haute fréquences conduit à de curieux résultats.

La section IV est réservée aux phénomènes transitoires dans le temps et l'espace. Alors qu'à la division précédente du livre, on a pu ne laisser subsister qu'une seule variable indépendante, la distance, grâce à l'emploi des complexes imaginaires de l'auteur rendu possible par la variation sinusoïdale dans le temps des grandeurs envisagées, la nature transitoire de la fonction du temps des phénomènes étudiés ici requiert l'usage de deux variables indépendantes, temps et espace. Devant cette circonstance défavorable à la simplicité de la mise en équations des problèmes, le talent du mathématicien s'est révélé extraordinairement puissant.

Les équations générales sont établies, résolues et discutées avec clarté et élégance dans les deux premiers chapitres.

On en déduit les relations caractérisant les ondes fixes ou stationnaires, dont on découvre les deux formes possibles dans le temps (oscillatoire et exponentielle); certaines constantes importantes sont précisées par l'examen de quatre applications numériques : ligne de transmission de grande puissance, à haut potentiel, et aérienne ; câble souterrain de transport d'énergie à haute

Digitized by Google

tension ; câble téléphonique sous-marin ; circuit téléphonique aérien à longue distance.

Au chapitre des ondes mobiles, on rencontre les diverses formes d'équations de celles-ci, la décomposition de l'onde en onde sinus et onde coxinus, l'assimilation des équations de la ligne de courants alternatifs à longue distance à un cas particulier de l'onde mobile, etc.

Les oscillations libres sont ensuite présentées avec d'amples détails.

Les derniers chapitres, très substantiels, traitent des points de transition et du circuit complexe, tel qu'il se présente en pratique, formé de plusieurs parties (générateurs, transformateurs, lignes, récepteurs), chacune d'elles ayant ses constantes particulières uniformément réparties ; de la réflexion et de la réfraction des ondes aux points de transition ; enfin des décharges d'inductance dans un circuit à constantes distribuées.

L'aperçu que nous venons de donner est forcément rendu incomplet par l'abondance et la complexité de la matière accumulée dans ce livre, qui impose par la science profonde et la somme considérable de travail qu'il reflète. Il s'en dégage néanmoins la conclusion que les phénomènes transitoires doivent être pris en sérieuse considération par l'ingénieur dans la plupart des spécialités de l'électrotechnique ; cette obligation semble devoir être plus impérieuse encore dans l'avenir, qui verra sans doute s'allonger démesurément les lignes de transport d'énergie et croître corrélativement leur puissance et leur tension.

La traduction qu'a faite M. Bunet n'enlève rien à l'attrait et à la valeur de cet ouvrage de grande envergure. Quelques notes judicieuses attirent l'attention du lecteur sur certains points effleurés seulement par l'auteur ou

Digitized by Google

donnent des renseignements complémentaires de nature à faciliter la compréhension du texte. Enfin l'impression est irréprochable. Nous ne risquons donc guère de nous tromper en prédisant un franc succès à l'œuvre du professeur Steinmetz.

J. NOLLET.

Digitized by Google

SÉANCE DU 14 DÉCEMBRE 1913.

M. J. Libert, *vice-président*, au fauteuil.

Ont signé la liste de présence, MM. : Allard ; Belli ; Belloin ; Binder ; Biske ; Bouffart ; Bourda ; Brodsky ; Calmeau ; Carretta ; Chapiro ; Comhaire ; Courtois ; De Bast ; Delsemme ; Demoulin ; Drumaux, P. ; Gerard, A. ; Gerard, Eric ; Gosseries ; Grimaldi ; Grottendieck ; Groubstein ; Hansen ; Hoietsky ; Kovarsky ; Küntziger ; Libert ; Noirfalise ; Pianelli ; Potok ; Prentki ; Verdurand ; Verlinden ; Walle ; Watelet.

M. J. Libert dépose sur le bureau les ouvrages suivants, offerts à l'Association :

Les nouvelles expériences relatives à la démonstration mécanique de la rotation de la Terre, par Henry Janne, ingénieur A. I. Lg., A. I. M. (Extrait de la *Revue des Questions Scientifiques*). Louvain, 1913.

La soudure autogène, publication de l'Institut Scientifique et Industriel. Paris, 1913.

Le camarade **F. Courtoy** développe sa communication sur la production de l'électricité dans les régions industrielles ; le texte en sera publié prochainement au Bulletin.

M. J. Libert, *vice-président*, remercie l'orateur dont la très intéressante conférence a captivé l'attention de l'assemblée.

La séance est levée à 13 heures.

Digitized by Google

MÉMOIRE

621.365.1 **Synthèse des oxydes d'azote par l'arc électrique.** (1)

La question de la fixation industrielle de l'azote de l'air est généralement connue dans l'histoire des sciences sous le nom de « dilemme de Crookes » ou « problème du blé ».

C'est en 1890, au meeting tenu à Bristol, pour l'avancement des sciences, par l'Association Britannique, que le grand académicien, dans son discours inaugural, lança le cri d'alarme.

S'appuyant d'une part, sur l'accroissement de la population chez les nations de race blanche pendant le siècle dernier, et d'autre part, sur l'extension possible de la culture des céréales sur toute la terre, Crookes prédisait que bientôt la production du blé ne pourrait plus suffire à leurs besoins.

Or, la consommation des céréales joue un rôle essentiel dans l'alimentation de ces peuples et, d'après les physiologistes, elle serait même la cause de leur supériorité intellectuelle.

Quelles que soient les objections faites aux calculs de Crookes et quelque restreintes que soient ses évaluations relatives à la surface disponible pour la culture, il n'en est pas moins vrai que ses prévisions concernant l'accroissement de la population ont été singulièrement dépassées au cours de cette dernière décade et que l'époque n'est

(1) Voir *Bulletin de l'A. I. M.*, tome XIII, 1913, p. 206, fasc. 5.

Digitized by Google

pas très lointaine où le problème se posera à l'attention des gouvernements et des peuples. Pour reculer l'échéance fatale, Crookes indiquait comme moyen la culture intensive.

On sait, en effet, que les plantes exigent pour leur développement de grandes quantités de carbone, d'eau, d'azote, d'acide phosphorique, de potasse. A côté de ces éléments qualifiés essentiels, il en existe d'autres secondaires dont les végétaux ne font qu'un usage restreint et qui se trouvent dans la terre en quantités et sous formes telles, que le cultivateur n'a pas à en redouter l'épuisement par la végétation.

De ce nombre sont le fer, le soufre et presque toujours la chaux et la magnésie.

Enfin, les plantes renferment d'autres éléments en proportions infinitésimales, dont l'ensemble d'ailleurs ne dépasse jamais 0,1 % du poids total des végétaux. A cette catégorie appartiennent le silicium, le chlore, le sodium, le manganèse, l'aluminium, le bore, le zinc et d'autres corps plus rares.

Leur étude est à peine ébauchée et leur influence sur la végétation, du moins en ce qui concerne le zinc et le manganèse, semble se rattacher au domaine des actions par catalyse [1].

Les plantes trouvent le carbone et la vapeur d'eau en quantités suffisantes dans l'air.

Mais la potasse, l'acide phosphorique et l'azote n'existent, en général, dans les terres qu'en proportions insuffisantes pour produire des récoltes abondantes. Si ces trois éléments ont, au point de vue de la fertilité, une égale importance, il n'en est pas moins vrai que l'azote présente pour le cultivateur un intérêt tout particulier,

(1) Sur le Rôle des Infiniment Petits en Agriculture, par Gabriel Bertrand (*Revue Scientifique*, 18 janvier 1913).

Digitized by Google

d'où sa grande valeur vénale. Son assimilation [1] suit d'ailleurs un processus très spécial sur lequel nous devons nous étendre quelque peu.

Les recherches de Wilfart et de Hellriegel ont montré que, seules, certaines légumineuses, comme le trèfle, la luzerne, etc., jouissent de la propriété d'absorber directement l'azote de l'air.

Cette fixation résulte de l'action du microbe Rhizobium radicicola vivant en symbiose sur les racines des plantes. Laurent reconnut que les *nodosités* où vivent ces colonies devaient avoir le libre accès de l'air pour se trouver dans des conditions favorables et que le phénomène étant endothermique, les microbes détruisaient en même temps une certaine quantité de matières hydrocarbonées.

Pour les autres végétaux, l'assimilation de l'azote suit un tout autre processus et c'est seulement sous la forme nitrique que l'azote peut être absorbé par les racines des plantes.

C'est à Müntz et Schlösing que l'on doit les premières déterminations ; ils ont montré que la nitrification des matières ammoniacales s'effectuait sous l'action de ferments nitrificateurs très répandus dans la nature.

La température optima de leur développement est 37°C ; leurs fonctions s'arrêtent à 55° et ils meurent à 70°C.

Quant aux matières albuminoïdes, elles se décomposent dans le sol et donnent naissance à de l'ammoniaque, qui se transforme finalement en acide nitrique.

Cependant, d'après les recherches de Widnogradsky et Warrington, le premier terme d'oxydation serait de l'acide nitreux.

(1) L. Pierron. Les Engrais azotés et leur synthèse. (*Revue de Chimie Industrielle*, Mai 1906). — Voir aussi Alois Kroczek : Fixation de l'azote atmosphérique dans la nature et dans la technique (*Oesterreichische Chemiker Zeitung*, nos 17 et 18, 1912).

Digitized by Google

L'acide nitrique serait dû au fait qu'il existerait à, côté des ferments nitrosococus producteurs d'acide nitreux, des organismes producteurs d'acide nitrique et dénommés nitrobacter.

Les premiers se développent activement et ont besoin de beaucoup d'oxygène ; les seconds progressent moins rapidement et pourraient, à moins de conditions tout à fait favorables, être étouffés par les premiers.

Signalons aussi qu'à côté de ces fermentations oxydantes, il en existe d'autres, réductrices, qui jouent un rôle prépondérant dans l'épuration biologique des eaux d'égout.

Quant aux quantités d'azote requises, elles sont régies par la loi du minimum, loi fondamentale de l'agronomie, formulée il y a plus d'un demi-siècle par J. de Liebig, dont voici l'énoncé :

« Le poids d'une récolte est forcément limité par l'assimilation de l'élément existant en moindre quantité dans le sol ou mis à sa disposition par la fumure. »

Le meilleur critérium des exigences des végétaux en principes nutritifs, écrit M. Louis Grandeau [1], nous sera donné par la quantité de chacun d'eux que contient la récolte.

Plus particulièrement en ce qui concerne l'azote, les docteurs Gilbert et Bailey ont admis les chiffres moyens suivants :

	Récolte.			Azote.
Blé	31 hectolitres	à l'hectare,		66 kg.
Seigle	27	»	»	57 »
Orge	36	»	»	51 »
Avoine	54	»	»	62 »
Pommes de terre.	730 kg.		»	33 »
Betteraves . . .	30,000 kg.		»	61 »

(1) Louis Grandeau : « l'Azote nitrique. »

Digitized by Google

Si nous examinons à présent la question des réserves d'azote, nous pouvons distinguer :

1° l'azote provenant de l'atmosphère ;

2° l'azote provenant des engrais azotés ;

I. — Azote de l'air.

Cette réserve est immense ; malheureusement, ce corps s'y trouve à un état non assimilable par la plupart des plantes.

A chaque mètre carré de la surface de la terre correspond, en effet, un poids d'azote égal à 7,27 tonnes métriques. Une utilisation indirecte existe, il est vrai, dans la pratique des engrais verts. On enfouit dans le sol les légumineuses ; l'azote emprunté à l'atmosphère et contenu dans ces plantes subit la nitrification et est absorbé par les récoltes subséquentes.

II. — Engrais azotés industriels.

L'azote se rencontre dans les engrais azotés sous trois formes : la forme organique, la forme ammoniacale et la forme nitrique.

a) *Engrais azotés organiques.* — A cette catégorie appartiennent les fumiers, les déchets de paille, les déchets d'organismes, les eaux-vannes, les guanos, les poudrettes, le sang des animaux, etc.

Le plus important est sans contredit le fumier. Mais sa faible teneur en principes fertilisants (1,000 kg contiennent en moyenne $5^{kg}500$ d'azote, 2 kg d'acide phosphorique et 6 kg de potasse) et la nécessité de l'employer en grandes quantités (50 à 60 tonnes à l'hectare) rendent son emploi extrêmement dispendieux.

D'autres corps, tels que les déchets d'organismes, guanos, etc., sont d'ordinaire plus riches en matières azotées. Malheureusement, dans ces engrais, l'azote doit

Digitized by Google

subir la nitrification pour pouvoir être absorbé par les plantes, ce qui implique nécessairement une perte appréciable.

De plus, ces matières ne se trouvent sur le marché qu'en quantités plutôt restreintes et ne pourront jamais, par conséquent, donner une solution complète du dilemme posé par Crookes.

b) Sels ammoniacaux. — Les sources de sels ammoniacaux sont au nombre de trois :

1° La distillation des combustibles fossiles ;

2° Le traitement des matières animales ;

3° La distillation des eaux vannes.

La distillation des combustibles fossiles [1] constitue la source de loin la plus importante. A l'heure actuelle, la récupération de l'ammoniaque se pratique sur une grande échelle, dans les fours à coke, dans les usines à gaz, dans les gazogènes système Mond. La distillation de la tourbe et des schistes y contribue pour une part assez importante, tandis que l'application de la récupération aux hauts fourneaux est beaucoup plus restreinte.

Dans les fours à coke et les usines à gaz, la récupération de l'azote est loin d'être complète. Tout l'azote ne se dégage pas pendant la distillation et, chose assez curieuse, la proportion n'en est pas constante. Le rendement moyen d'une tonne de houille en sulfate d'ammoniaque est de 12 kg. En nous basant sur les travaux classiques de Förster et de Knoblauch, l'utilisation moyenne de l'azote rentermée dans la houille est la suivante :

(1) Léon Greiner. — Etat actuel de l'Industrie des Engrais azotés. *Revue Universelle des Mines*, 4e série, tome XXVII, 1er numéro, 1909.

Digitized by Google

	Forster	Knoblauch
Sous forme NH_3	14,50	10 à 14
» cyanogène . . .	1,56	1,5 à 2
» azote libre . . .	35 à 25	47 à 57
Dans le goudron	—	1 à 1,2
Dans le coke.	48,58	31 à 36

La récupération de l'ammoniaque dans les gaz sortant du gueulard des hauts fourneaux constituait un problème beaucoup plus compliqué. Pour la réaliser, il faut, en effet, utiliser des charbons spéciaux, splint coal, anthraciteux peu cendreux et pas collants. Les installations sont très coûteuses. Il se trouve en Ecosse quelques applications de ce genre. C'est ainsi qu'aux usines Merry et Cuning les canalisations ont un développement linéaire de 9,000 m. de tubes, ayant une surface de 5,320 m². Le rendement y est de 8,4 kg de $Am_2 SO_4$ par tonne de houille consommée.

Le procédé Mond constitue une solution beaucoup plus élégante et plus complète de la question. Dans ce système, la combustion de la houille se pratique en présence d'un excès de vapeur d'eau. La production d'hydrogène naissante et la température relativement basse à laquelle se fait la gazéification sont des facteurs très favorables à l'obtention d'ammoniaque. Aussi le rendement atteint-il jusqu'à 60 à 70 % de l'azote de la houille. Pour 1 tonne de combustible, on insuffle 2 tonnes de vapeur d'eau. On obtient ainsi 40 à 45 kg de $Am_2 SO_4$ et, en moyenne, 3,500 m³ de gaz d'un pouvoir calorifique de 1,100 à 1,200 calories. Ce gaz, débarrassé de son ammoniaque, est utilisé pour la production de la force motrice.

Plusieurs installations de ce genre existent en Angleterre, en Allemagne et dans d'autres pays.

Anciennement, on faisait subir à la tourbe une distilla-

Digitized by Google

tion sèche, mais, comme l'estimaient MM. Müntz et Lainé [1], la majeure partie de l'azote restait fixée par le coke résiduel. L'application du système Mond à la distillation de la tourbe ne se fit pas sans grandes difficultés.

Woltereck [2] entreprit la gazéification à plus basse température, 300° à 500°. Il remplaçait la vapeur par de l'eau pulvérisée, mais la réaction était trop lente. Jones et Suarez reprirent la gazéification à température plus élevée, 600 à 800°, et ajoutèrent assez d'air pour que, dans la zone de réaction, on eût un mélange incombustible même à 800°. En surchauffant l'air et la vapeur à 450°, la Deutsche Mondgas und Nebenprodukten Gesellschaft, à Sodingen-am-Rhein, est parvenue à traiter de la tourbe à 60 % d'eau. On arrive ainsi à une production de 40 kg de $Am_2 SO_4$ par tonne de tourbe sèche traitée. Quant au gaz produit, il a un pouvoir calorifique qui atteint 1,400 calories. Pour une force motrice de 1,000 HP an à Sodingen, on estime qu'il faut exploiter 4 Ha de tourbières sous une profondeur de 3 m. Ce procédé est susceptible d'une grande extension.

Enfin, la distillation de certains schistes permet aussi la récupération de notables quantités d'ammoniaque. En Angleterre la quantité de sulfate ainsi produite s'élève à plus de 50,000 tonnes.

Par le traitement des matières animales on obtient de même une quantité d'ammoniaque assez importante.

Le cuir ayant 6 à 9 % d'azote, la laine et la corne 13 à 16 %, on les torréfie et on recueille l'ammoniaque formé.

(1) Henri Rousset. — Emploi de la tourbe pour la fabrication des engrais, des sels ammoniacaux et des nitrates (*Revue générale de Chimie pure et appliquée*, 13 septembre 1908).

(2) Hölbling. — Les nouvelles méthodes pour la préparation de l'ammoniaque (*Oesterreichische Chemiker Zeitung*, mai 1912).

Digitized by Google

Il en est de même de la calcination du noir animal.

Enfin, la distillation des eaux-vannes pourrait fournir de grandes quantités de sels ammoniacaux. On sait que l'urée en solution dans l'eau se dédouble sous l'action du micrococcus ureae, en ammoniaque et que souvent les eaux-vannes en renferment de 25 à 30 kg par mètre cube. La méthode la plus répandue consiste à séparer la partie solide de la partie liquide et à soumettre celle-ci à la distillation, après une fermentation préalable.

Quant aux résidus solides, on les dessèche et on les vend sous le nom de poudrettes.

La production du sulfate d'ammoniaque augmente très rapidement, comme l'indique le tableau suivant :

Années.	Production en tonnes.	Années.	Production en tonnes.
1899	210.000	1910	1.112.000
1905	700.000	1911	1.150.000
1907	845.000		

c) Azote sous forme nitrique. — Les gisements de nitrate de l'Amérique du Sud (Pérou, Bolivie, Chili) ont acquis une importance extraordinaire. L'exportation de ce sel a suivi d'ailleurs une marche ascendante, comme l'indique le tableau suivant :

Années.	Totaux (en tonnes).	Années.	Totaux (en tonnes).
1831	100	1904	1.446.000
1856	20.000	1906	1.642.000
1870	103.000	1908	2.014 000
1890	884.000	1910	2.327.000
1900	1.334.000	1911	2.487.000
1902	1.269.000	1912	2.540.000 (1)

L'évaluation de la durée des gîtes chiliens a donné lieu d'ailleurs à de nombreuses controverses. En 1900, M. Vergara prédisait l'épuisement des gisements pour 1923, tandis que le gouvernement chilien, en 1907, en reculait l'échéance jusqu'en 2032. Toujours est-il que la

(1) Rapport semestriel de MM. Mongommery and Co, 1912.

Digitized by Google

fin des gîtes ne semble pas à prévoir. D'après des renseignements donnés à M. Th. Schloesing (1) par M. Lemétayer, agent officiel du gouvernement chilien, on n'aurait évalué les gisements que sur une fraction des 200.000 km² qu'ils occupent et les quantités reconnues ne représentent peut-être que le 1/10 de ce qui existe.

Bien que ces réserves soient très étendues, la situation de la plupart des usines est loin d'être prospère, par suite du prix toujours plus élevé de la main-d'œuvre et de l'appauvrissement constant des gîtes.

Autrefois, on ne traitait que des caliches riches de 40 à 60 %; à l'heure actuelle, il arrive souvent que l'on traite des caliches moyennes de 30 à 40 % et parfois plus pauvres encore.

La composition du nitrate de soude pur est la suivante :

Soude 36,47 %, acide nitrique 63,53 % (azote 16,47 %). Le nitrate de soude commercial ne renferme que 15,5 à 15,6 % d'azote.

D'autres gîtes ont été trouvés en Colombie, en Californie, au Caucase et même au Sahara. Mais ils sont de richesse et d'étendue moindres.

La valeur du nitrate de soude ressort clairement du tableau suivant (2) :

Nitrate de soude	valeur comme engrais azoté		100
Sulfate d'ammoniaque.	id.	id.	90
Sang desséché, corne en poudre.	id.	id.	70
Poudre d'os, guanos de poisson .	id.	id.	60
Fumier de ferme.	id.	id.	45
Laine en bourre.	id.	id.	30

La consommation du nitre chilien augmente annuellement de 150,000 tonnes, malgré le développement corré-

(1) Th. Schloesing. — Fabrication électrochimique de l'acide nitrique (*Technique moderne*, mai 1910).

(2) J. Escard. — La fabrication électrochimique de l'acide nitrique et des dérivés nitrés.

Digitized by Google

latif de la production du sulfate d'ammoniaque. Les prix (1) s'élèvent sans cesse, et, à l'heure actuelle, ils oscillent aux environs de fr. 1,80 pour le salpêtre et pour le sulfate d'ammoniaque par kilogramme d'azote.

« Mais, disait Crookes, avant que nous ne soyons saisis par l'étreinte d'une disette, le chimiste sera intervenu et il aura reculé le jour de la famine à une date si éloignée, que nous pourrons, avec nos fils et nos arrière-petits-fils, vivre sans nous inquiéter de l'avenir. »

Les prévisions du grand physicien se sont réalisées, et à l'heure présente, les fabrications synthétiques de l'acide nitrique et de l'ammoniaque sont réalisées industriellement.

Ce même problème, considéré au point de vue humanitaire, permettra de résoudre de façon certaine le problème du pain à bon marché, de l'alimentation à bon compte. L'azote étant l'élément fertilisant dont la valeur vénale est la plus élevée, il est inutile d'insister sur les conséquences que pourrait avoir la solution du problème à un taux convenable. « Dès ce jour, comme le disait si éloquemment le professeur Ph. A. Guye (2), les engrais complets prendront une extension colossale, les rendements de toutes les cultures augmenteront dans une proportion dont nul ne peut prévoir les limites, entraînant par la suite un abaissement considérable du prix de revient dans les produits de l'alimentation. Le problème de l'azote apparaît ainsi comme un des facteurs importants de la question sociale, un des seuls, peut-être, qui permettent d'envisager un jour quelque solution vraiment scientifique. »

(1) Cours du 3 février 1913, à Anvers.

(2) Ph. A. Guye. — La fixation industrielle de l'azote (*Bulletin de la Société chimique de France*, nos 20 et 21, 1909).

Digitized by Google

I. — SOLUTIONS SYNTHÉTIQUES.

Ces solutions ont pour but la fixation de l'azote de l'air, soit à l'état d'ammoniaque, soit à l'état d'acide nitrique. D'autre part, la transformation de l'ammoniaque en acide nitrique est relativement aisée.

Ammoniaque synthétique (1).

Synthèse directe. — La synthèse de l'ammoniaque est aujourd'hui résolue ; les efforts faits au début dans ce sens laissaient pourtant peu d'espoir, vu l'indifférence réactionnelle de l'azote et le peu d'affinité qui existe entre l'azote et l'hydrogène. Il y a quelques années, en 1907, Nernst, devant la Société allemande de Bunsen, émettait encore des doutes sur la solution pratique de ce problème, à la suite de ses recherches sur cet équilibre chimique.

Dès 1859, Morren opérant avec l'étincelle d'induction d'une bobine Rhumkorff, dans un mélange d'hydrogène et d'azote, avait constaté la formation d'ammoniaque.

Chabrier, V. et A. Thénard et Delville, opérant avec l'effluve électrique, dans les mêmes conditions, arrivèrent au même résultat. Ils signalaient de plus la nécessité d'absorber l'ammoniaque au fur et à mesure de sa formation, si l'on ne voulait pas avoir une synthèse très limitée. Berthelot, en 1876, confirmait ces conclusions. A la suite des beaux travaux de notre compatriote de Hemptinne (1901) (2) et de la remarquable étude de Briner et

(1) Austerweil. — L'utilisation de l'azote de l'air (*Revue Générale de Chimie pure et appliquée*, 18 mars 1906).

(2) Bernthsen. — Ammoniaque synthétique. Communication au VIIIme Congrès international de chimie appliquée, de New-York (*Chemiker Zeitung*, 1er octobre 1912).

Digitized by Google

Mettler (1), il devint évident qu'on dut abandonner l'espoir de réaliser pratiquement la synthèse de l'ammoniaque sous cette forme. Entretemps, en 1881, Johnson avait découvert l'influence des matières catalysantes. Il fit passer de l'azote et de l'hydrogène sur de la mousse de platine et trouva un peu d'ammonium. L'azote provenait de la décomposition du nitrite d'ammoniaque, les oxydes de N étant absorbés par $FeSO_4$. Avec l'azote préparé par une autre voie, le résultat était négatif. C'est ce que constatèrent également Wright en 1881 et Baecker en 1883, Ramsay et Young en 1884 et Pirman en 1904.

Haber et Van Forks (2) dirigeaient les gaz N et H d'abord sur du Fe, en suite du Ni, aux environs de 1000°. Il y eut production d'ammoniaque, mais le rendement ne fut point satisfaisant.

Enfin, Woltereck (3) a fait breveter divers procédés de préparation de l'ammoniaque par catalyse en partant d'un mélange d'azote et de gaz riche en hydrogène (gaz d'éclairage, gaz à l'eau) ou vapeur d'eau. Comme catalyseur, il employait primitivement l'oxyde de fer au rouge naissant. Depuis, il en est revenu à du fer finiment pulvérisé et opère à une température de 300° à 400°.

Cependant si l'on examine la formule de réaction

$$N_2 + 3\,H_2 = 2\,NH_3$$

l'on voit que celle-ci se faisant avec une réduction de volume, une augmentation de pression influencera la constante d'équilibre dans un sens favorable.

(1) Briner et Mettler. — *Journal de Physique et de Chimie*, juin 1906.

(2) Haber et Van Forks. — Fabrication catalytique d'ammoniaque en partant d'azote et d'hydrogène (*Revue de Chimie industrielle*, Août 1905).

(3) Fabrication NH_3 synthétique (*American Scientific*, 6 nov. 1909).

Harman Woltereck, Synthetisches Armmoniak (*Chemiker Zeitung*, 30 novembre 1912).

Digitized by Google

Nernst fit des essais dans cette voie ; il opérait avec des catalyseurs et sous une pression de 50 atmosphères. Les résultats furent défectueux.

Depuis 1904, le professeur F. Haber [1] avait entrepris avec Van Oordt des recherches sur l'équilibre chimique

$$N_2 + 3\,H_2 \rightleftarrows 2\,NH_3.$$

A la pression ordinaire et même pour des pressions plus élevées, l'équilibre était très défavorable. Il poursuivit ces études avec Le Rossignol ; ensuite, depuis 1908, avec le concours de la Badische Anilin und Soda Fabrik, Il prouva que la production d'ammoniaque était possible sous pression constante et à une température déterminée, à condition d'enlever l'ammoniaque formé, soit par absorption, soit par condensation. Dans son appareil, il travaille sous pression de 200 atmosphères et à une température de 650 à 700°. La masse catalytique est le fer pur ; le débit de gaz, 250 litres par heure ; la production horaire, 250 grammes d'ammoniaque liquide.

Comme autres catalyseurs, Haber a employé l'osmium, puis l'uranium. La réalisation de cet appareil a donné lieu à de grandes difficultés sur lesquelles nous ne pouvons nous étendre ici. A l'occasion de cette étude, la Badische Anilin und Soda Fabrik a fait entreprendre de longs travaux sur les divers catalyseurs. Malgré tout l'intérêt de ces travaux et malgré les conclusions remarquables qui en découlent, nous ne pouvons nous y arrêter plus longtemps.

Disons que la première usine à ammoniaque synthétique est à l'heure actuelle en construction à Oppau, près de Ludwigshafen.

---

(1) Alf. Grandenwitz. — Production de NH_2 par synthèse (*The Enginneering and Mining Journal*, 10 septembre 1912).
Bernthsen. Op. cit.

Digitized by Google

Synthèse indirecte de l'ammoniaque. — Ces procédés comportent une fixation préalable de l'azote atmosphérique sur les métaux et la transformation subséquente des composés ainsi formés en ammoniaque : nous distinguerons la formation de la cyanamide, des cyanures et des azotures.

A. *Cyanamide de calcium.* — C'est en 1895 que Frank et Caro trouvèrent la cyanamide. A ce moment, les méthodes de cyanuration pour l'extraction de l'or et de l'argent de leurs minerais venaient d'être appliquées, et s'appuyant sur les recherches antérieures de Moissan et de Bunsen, Frank et Caro cherchaient à produire des cyanures.

En réalité, ils obtinrent de la cyanamide.

La réaction est très simple, on fait passer de l'azote sur du carbure chauffé aux environs de 1,000 degrés. La réaction étant endothermique, il suffit de l'amorcer.

On a :

$$Ca\,O + 3\,C = Ca\,C_2 + CO$$
$$Ca\,C_2 + N_2 = Ca\,C\,N_2 + C.$$

Le produit final sera donc un mélange de cyanamide de calcium et de carbone. En réalité, il reste encore des traces de carbure non transformé, de dicyanamide, de chaux, de silice, de fer et d'alumine, ces derniers provenant des matières premières.

Pour faciliter la fixation de l'azote, on a proposé des additions de chlorure de calcium (Polséniusz), de fluorure de calcium (Carlson), d'un mélange de carbonate alcalino-terreux et de charbon (Kühling), etc. La cyanamide de calcium constitue un engrais azoté, mais les déboires obtenus au début de son emploi en ont longtemps retardé le développement. Le procédé est exploité à l'heure actuelle sur une grande échelle, néanmoins certaines usines transforment la cyanamide en sulfate d'ammo-

Digitized by Google

niaque, corps avec lequel le cultivateur est déjà familiarisé. Pour ce, on traite par la vapeur d'eau et sous pression.

D'après Frank, on a :

$$Ca\,C\,N_2 + 3\,H_2O = Ca\,CO_3 + 2\,N\,H_3$$

B) *Cyanures* (1). — Bien que cette méthode n'offre aucun intérêt au point de vue de la fabrication des composés ammoniacaux, nous croyons cependant devoir en rappeler les grandes lignes, étant donné son intérêt historique.

C'est Newton qui prit le premier brevet en 1840. Il faisait passer de l'air sur du charbon de bois imprégné de 20 à 30 % de K_2CO_3. Le rendement en cyanure était de 50 %.

Plus tard, Marguerite et Sourdeval, en 1862, employèrent le carbonate barytique, mélangé à 20 ou 30 fois son volume de goudron de houille ou de coke. On portait le tout à une haute température et ensuite, pour obtenir de l'ammoniaque, on traitait par la vapeur d'eau. En même temps, on régénérait ainsi du carbonate barytique plus apte au travail. Ce procédé donna de mauvais résultats.

En 1882, Mond reprit cette idée ; il formait un mélange de carbonate de baryum, de coke, de poix ou de goudron ; confectionnait des briquettes de petites dimensions et ajoutait de la chaux et de la magnésie pour rendre le mélange moins friable. Il chauffait entre 1,200° et 1,400° et faisait passer un courant d'azote avec le moins possible d'oxygène, de vapeur d'eau et d'acide carbonique. La masse refroidie à 500° était traitée par un courant de vapeur d'eau pour former de l'ammoniaque. Le rendement était environ 50 % du rendement théorique. Malgré

(1) M. Manuelli. — L'industrie des dérivés du cyanogène à partir de l'azote atmosphérique (*Bulletin de la Société chimique de Milan*, tome XIV, 1908).

Digitized by Google

les diverses modifications proposées et l'étude théorique faite de ce procédé par Brenneman, cette méthode n'a pu donner de bons résultats.

c) *Azotures* (1). — Le procédé de ce groupe très important repose sur la combinaison de l'azote aux métaux sous forme d'azotures.

La plupart des inventeurs tentèrent de préparer industriellement les azotures par réduction des oxydes métalliques au moyen du charbon.

Wilson voulait fabriquer des azotures d'aluminium, de calcium, de titane ; Chalmot, de l'azoture d'aluminium ; Mehner, de l'azoture de silicium. Tous les essais faits au four pour préparer des azotures ont échoué ou n'ont conduit qu'à la formation des carbures.

Ces carbures, toutefois, contiennent toujours une petite quantité d'azote.

La Badische Anilin fit préparer l'azoture de titane et l'azoture de silicium ; mais aucune application en grand n'en a été faite.

Enfin, le docteur Serpeck (2) a trouvé un procédé rémunérateur pour la fabrication d'azoture d'aluminium. Ce dernier se prépare en faisant passer de l'azote sur de l'aluminium chauffé à 700°. Pour rendre le procédé industriel, Serpeck remplace d'abord le métal par le carbure en présence d'alumine :

$$Al_4 C_3 + Al_2 O_3 + 6 N = 6 AI N + 3 C O$$

Enfin, pour pouvoir lutter avantageusement, il trouva qu'on peut effectuer la réaction en portant de l'oxyde du carbone et de l'azote à une température de 1800°C.

$$Al_2 O_3 + 3 C + 2 N = Al_2 N_2 + 3 C O$$

(1) Hölbling, Op. cit.

(2) Camille Matignon. — La fixation industrielle de l'azote de l'air. *Bulletin de la Société d'encouragement*, 8 juin 1913.

Digitized by Google

Cependant, vu la grande chaleur de formation du nitrure d'aluminium, cette réaction semble étrange. Mais les corps formés sont très stables, de plus le nombre de molécules gazeuses est plus élevé dans le deuxième membre que dans le premier.

Il suit de là, en vertu de la loi de la volatilité énoncée tout récemment par M. Camille Matignon, que le passage de l'état initial à l'état final est possible tout en supportant une forte endothermicité. La réaction lente à 1,500°C est rapide à 1,800°C. L'opération se pratique dans un four à résistance en carbone absorbant un courant de 10,000 ampères sous 230 volts. Le revêtement est en nitrure d'aluminium. Quant à l'ammoniaque, on l'obtient en traitant par la vapeur d'eau.

$$Al_2N_2 + 3H_2O = Al_2O_3 + 2NH_3.$$

Le procédé a été étudié par la Compagnie générale des nitrures à l'usine de Saint-Jean de Maurienne en Savoie, appartenant à la Société des Produits chimiques d'Alais et de la Camargue.

Toutes les fabriques françaises d'aluminium, un consortium américain et la Société Badoise ont obtenu des licences du brevet Serpeck.

D'autres usines ont également acquis le procédé pour la production d'ammoniaque, mais ne peuvent vendre l'alumine.

Signalons encore que tout récemment le Dr Serpeck [1] a annoncé que l'emploi de corps catalyseurs permettrait de réduire la température de fixation, ainsi que la durée des opérations. Il en est ainsi de l'hydrogène, du fer et de certains autres métaux.

(1) Communication du Dr Serpeck (*Verein Oesterreichischer Chemiker*, 4 février 1913).

Digitized by Google

Procédé Auzies (1). — Ce procédé original ne rentre pas dans la classification précédente, nous l'examinerons ci-dessous (2).

Transformation de l'ammoniaque en acide nitrique.

A la préparation synthétique de l'ammoniaque se rattache sa transformation en acide nitrique.

Nous distinguerons le procédé chimique et le procédé bactériologique.

Méthode d'Oswald (3). — On sait, depuis Kühlmann et Schönbein, qu'un mélange d'ammoniaque et d'air passant sur du platine spongieux à une température de 308°, se transforme en acide nitrique.

Le mélange catalyseur employé par Oswald est composé de rhodium, d'iridium, de platine spongieux. La Gesellschaft des Stein Kohlenbergwerks Lothringen exploite ce procédé à Gerthe et produit annuellement 180 tonnes de HNO_3.

Aux Usines Buché, à Vilvorde, ce procédé est aussi en essai industriel. Les catalyseurs sont portés à une température de 300° et les gaz passent avec une vitesse telle que la durée de contact n'est pas supérieure à 1/500 de seconde. La production d'un tel appareil ne serait pas

(1) M. Auzies. — La fixation industrielle de l'azote. (*Revue générale de Chimie pure et appliquée*, janvier 1912).

(2) Il existe encore un autre procédé de synthèse pour la préparation du sulfate d'ammoniaque en partant du soufre et de l'azote : c'est le procédé Björne et Thornsell, en essai à la Gvaestof Industry Aktiebolaget, à Gothenbourg (Suède) ; malheureusement, nous n'avons pu nous procurer de renseignements sur cette méthode.

(3) G. Flusin. — L'état actuel et les tendances de l'Industrie électrochimique du nitrate de chaux (*Technique moderne*, octobre-novembre 1910).

Digitized by Google

inférieure à 90 kg d'acide nitrique par jour. D'autres catalyseurs ont été proposés.

M. Bayer, de son côté, remplace la mousse de platine par les oxydes des métaux lourds, tandis que Cats et Renders sont arrivés avec du Fe_2O_3 chauffé entre 650° et 700° C à un rendement de 98 %.

Méthode de Müntz et Lainé (1). — Les sels ammoniacaux, sous l'influence de microbes se transformant en sels nitriques, MM. Müntz et Lainé en ont déduit une méthode très élégante pour passer de la forme ammoniacale à la forme nitrique. Des morceaux de tourbe mélangés à du calcaire et ensemencés avec des ferments nitrificateurs sont disposés en couches de 2 mètres d'épaisseur sur un lit d'escarbilles.

Pendant un mois, les ferments sont soumis à un régime approprié dans le but d'accroître leur puissance. Au bout de ce temps, on déverse continuellement sur la nitrière une solution de sulfate d'ammoniaque et on recueille une solution de nitrate de chaux.

D'après MM. Müntz et Lainé, la production journalière d'une telle nitrière, d'une superficie de 10 hectares, serait de 1,300 à 1,500 tonnes de nitrate de chaux.

Synthèse de l'acide nitrique.

A) *Procédé de la Badische.* — La Badische Anilin und Soda Fabrik réalise la combinaison de l'azote et de l'oxygène en faisant brûler l'air dans des flammes de CO sous pression.

Ce procédé présente des difficultés considérables, et jusqu'à présent n'a pas reçu d'application pratique.

(1) Henri Rousset, Op. cit.

Digitized by Google

B) *Procédé Haüsser* [1]. — De son côté, M. Haüsser a cherché à utiliser les gaz des fours à coke à la production de l'acide nitrique. Il forme des mélanges explosifs d'air et de gaz, et après une compression préalable, il provoque l'explosion. Dès que la température voulue est atteinte, il hâte le refroidissement par détente. Le rendement serait de 100 grammes d'acide nitrique par mètre cube de four à coke. La Deutsche Stickstoff Industrie de Dortmund a subventionné ces essais. De plus, elle a fait construire une usine d'essai aux mines de Wendel à Hamm, en Westphalie, qui devait être mise en marche vers le 15 mai dernier.

C) *Procédé Bender.* — M. Bender obtient le bioxyde d'azote par la combustion sous pression d'un mélange de méthane et d'air dans un appareil spécial. Il arriverait à des concentrations très élevées : 2,85 % de NO en volume. Ce procédé est soumis à des essais industriels aux sources de gaz naturel de Kis Sarmas en Hongrie.

D) *Procédé Auzies.* — M. Auzies applique un procédé catalytique pour la préparation simultanée d'acide nitrique et d'ammoniaque. Il distille l'air liquide et travaille sur des mélanges égaux en volume d'azote et d'oxygène ; le supplément d'azote est additionné d'hydrogène et sert à la préparation d'ammoniaque.

Les gaz oxygène et azote passent sur des catalyseurs oxydes de métaux tels que le cobalt, le manganèse, le chrome, le nickel, le baryum, le palladium, le cérium, portés à une température appropriée. Le travail se fait évidemment en cycle fermé.

Le mélange N et H est dirigé sur les métaux Ni et Bo ou Ni et Al à une température inférieure au rouge. Il se

(1) *Zeischrift des Vereines Deutscher Ingenieure*, 20 juillet 1912. *Stahl und Eisen*, 19 septembre 1912.

Digitized by Google

produit du BoN ou de l'AIN et l'hydrogène, devenant naissant au contact du nickel, décompose l'azoture pour donner de l'ammoniaque. Les Usines des Vereinigte Chemische Fabriken vormals S. A. A. Auzies exploitent ce procédé en Allemagne ; et la Compagnie Bordelaise des Produits chimiques en a licence en France.

E) Enfin reste l'oxydation électrique de l'air qui fait plus spécialement l'objet de cette étude.

III. — HISTORIQUE DE LA QUESTION.

Avant d'aborder la théorie physicochimique du procédé, il est intéressant de jeter un rapide coup d'œil sur sa genèse et son développement.

Dès 1785, Priestley remarqua que l'étincelle électrique jaillissant dans une atmosphère humide provoquait la combinaison de l'azote et de l'oxygène. Trois ans plus tard, en 1788, Cavendish confirmait cette expérience au moyen de son eudiomètre. Plus tard, Davy constata la formation d'acide nitrique dans un mélange d'azote et d'air chauffé par un courant électrique et Böttger chercha déjà à distinguer si l'action électrique intervenait dans le phénomène au même titre que l'action thermique.

Le premier brevet sur la question date de 1859. Il fut pris en Angleterre par Mme Lefèbre. L'appareil employé se composait d'un flacon à trois tubulures : la première pour l'arrivée de l'air, la seconde pour le passage des électrodes, la troisième pour la sortie des gaz produits.

L'étincelle était produite par une bobine d'induction ; on remarquait une augmentation de rendement par l'envoi d'un courant d'oxygène. Newton, en 1859, aborda la question et Perot, en 1861, montrait que dans une masse d'air en mouvement, les décharges allongées produisent une plus grande quantité d'acide nitrique que les décharges

Digitized by Google

courtes. Puis vint Berthelot, en 1870, qui démontra que dans une atmosphère close, la production de bioxyde d'azote passe par une limite et prouva que l'arc électrique produit dans les gaz les mêmes effets chimiques que l'étincelle électrique.

En 1880, Spottiswoode et Dewar étudièrent complétement l'action des arcs à haute tension dans l'air.

Prim, en 1882, reprit l'idée de Mme Lefèbre et constata que le rendement augmentait avec la pression et l'humidité.

En 1892, Crookes confirma les idées de Berthelot et fit la démonstration de la synthèse à la Royal Society.

En 1893, Naville et les professeurs Charles-Eugène et Philippe Guye commencent leurs travaux remarquables, qui ont contribué pour la plus grande part à la solution de la question.

Lors de ses recherches mémorables sur l'argon lord Rayleigh s'occupa aussi de la question. Dans un récipient en verre, il produisait un arc absorbant une puissance de 1 HP. Il traitait par heure 20 litres d'un mélange : 11 d'oxygène et 9 d'air. Le bioxyde formé était absorbé par un jet de soude caustique en solution étendue. La production était de 50 grammes de HNO_3 par kwt-heure.

Lord Rayleigh signalait déjà les difficultés rencontrées pour produire un arc stable à haute tension ; il fallait, en effet, mettre en série avec l'appareil une résistance d'amortissement absorbant beaucoup de puissance.

Depuis lors, foule de savants se sont attachés à la question et pour ne dire que ceux-là nous citerons les noms de Von Lepel, de Max Dougal et Howless, de Muthmann et Hofer, de Bradley et Lovejoy, de Nernst, de Pauling, de Jellineck, de Kowalsky et Moscicki, de Briner et Durand, de Haber, de Le Blanc, de Birkeland et Eyde et de Schönherr.

Digitized by Google

Théorie de la fixation.

1° *Considérations physiques.* — Les considérations physiques auxquelles on peut avoir recours ont trait au fonctionnement de l'arc électrique.

Généralement, on assimile [1] l'arc voltaïque à une décharge électrique dans les gaz. La condition indispensable pour l'existence de l'arc est le maintien de la cathode à l'incandescence.

Se basant sur ce fait, Stark et J. J. Thomson ont fait l'hypothèse que la cathode émet des corpuscules négatifs en quantité d'autant plus importante que la température est plus élevée.

Ces corpuscules négatifs sont projetés avec une grande vitesse vers l'anode et dans leurs parcours rencontrent des molécules gazeuses. A la suite de ces chocs, un certain nombre de molécules de l'atmosphère gazeuse seront dissociées en ions électro-positifs et en ions électro-négatifs. Ces ions se mouvant en sens inverse provoqueront par leurs chocs de nouvelles ionisations. Il en résultera donc un bombardement de l'anode par les ions et les corpuscules négatifs et de la cathode par les ions positifs.

Quant à la relation reliant la tension, l'intensité du courant et la longueur de l'arc entre les électrodes, dans le cas de l'arc continu, elle se déduit des travaux remarquables de Mme Hertha Ayrton sur les arcs à courant continu entre charbons.

$$V = a + bl + \frac{c + dl}{i}$$

(1) Ch. E. Guye. — L'arc voltaïque, son mécanisme et ses applications. *Revue Scientifique*, 23 janvier 1909.

Digitized by Google

V désignant la différence de potentiel aux bornes des électrodes; l, la longueur de l'arc; i, l'intensité du courant; a, b, c, d des constantes variant avec la nature des charbons et de l'atmosphère gazeuse et la pression du gaz où jaillit l'arc.

Pour l'arc entre charbon, Mme Ayrton donne la formule :

$$V = 38,88 + 2,074\, l + \frac{11,66 + 10,54\, l}{i}$$

MM. Ch. E. Guye et Zébrikoff [1] ont appliqué la formule de Mme Ayrton aux arcs entre métaux et ont trouvé dans les cas du Cu et du Fe, qui nous intéressent ici :

$$\text{pour le Fe : } V = 15,73 + 2,52\, l + \frac{9,44 + 15,02\, l}{i}$$

$$\text{pour le Cu : } V = 21,38 + 3,03\, l + \frac{10,69 + 15,24\, l}{i}$$

Dans le cas de l'arc alternatif la différence de potentiel est moindre.

Un autre facteur important est la puissance consommée par l'arc. Elle n'est pas donnée par l'expression RI^2, résultant de l'application de la loi de Joule, la résistance du milieu variant dans de larges limites.

En effet, au début, le gaz traversé par le courant a une chaleur spécifique assez faible ; aux dégagements de calorique produits par le courant correspondent des variations périodiques très sensibles de la température des gaz traversés par l'arc et, partant, de leur résistance.

La puissance absorbée pourra donc être repréentée en général par

$$P = KEI \qquad K < 1$$

(1) Ch. E. Guye et Zébrikoff. — *Compte rendu de l'Académie des Sciences de Paris*, Séance du 16 juillet 1907.

Digitized by Google

De l'hypothèse de Thomson et de Stark, on peut déduire nombre de conséquences. Toute cause, qui aura pour effet de disséminer les ions, nécessitera une plus grande différence de potentiel et, par conséquent, tendra à éteindre l'arc. Il en est ainsi des courants d'air, des dispersions magnétiques, etc.

D'ailleurs, M. Morris [1] a constaté ce fait expérimentalement. Pour un arc placé dans un faible courant d'air, la différence de potentiel nécessaire était de 61 volts ; le même arc placé dans un champ magnétique de 3,500 à 4,000 lignes de forces par centimètre carré nécessitait 71 volts.

Par contre, toute cause ionisante sera favorable au maintien de l'arc. Il en résultera aussi que la stabilité de l'arc sera plus grande dans le cas du courant continu que dans le cas du courant alternatif. En effet, à chaque alternance, il y extinction de l'arc et refroidissement de la cathode. Ce dernier fait est d'autant plus important, que chaque électrode servant alternativement de cathode, la surface de refroidissement est ainsi doublée.

De même, les fréquences élevées seront préférables aux fréquences basses, où les périodes d'extinction sont plus longues. De plus, ces dernières seront fonction de la forme de la courbe de force électromotrice de l'alternateur. Plus la courbe de tension sera redressée, plus rapidement sera surmontée la résistance de l'arc et le milieu devenant de ce fait meilleur conducteur, la déformation des courbes d'intensité et de différence de potentiel sera moindre et le facteur de puissance notablement amélioré.

Dans le même ordre d'idées, Ch. E. Guye et A. Bron [2]

(1) *The Electrician*, 16 août 1907.

(2) Ch. E. Guye et A. Bron. — *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris*, Séance du 6 juillet 1908.

Digitized by Google

ont constaté qu'à chaque alternance pour l'arc entre métaux, la différence de potentiel qui précède immédiatement l'allumage atteignait une valeur d'autant plus grande que le poids atomique du métal électrode était plus élevé.

La loi de Dulong et Petit explique ce fait expérimental.

La chaleur spécifique étant en raison inverse du poids atomique, il s'en suit que l'abaissement de température à chaque extinction de la cathode est d'autant plus important que le poids atomique est plus élevé.

Pour assurer le bon fonctionnement des arcs, on sait qu'il est nécessaire de disposer dans le circuit des résistances additionnelles. La résistance de l'arc diminuant lorsque l'intensité du courant augmente, ces dernières réduiront la différence de potentiel aux bornes en provoquant une chute de tension croissant avec le courant.

On voit donc que la disposition des arcs en série constituera une solution avantageuse.

Dans le cas de courants alternatifs, on adoptera de préférence des bobines à self-induction. Elles entraînent, il est vrai, un déphasage du courant, mais la dissipation de puissance sera moindre que dans le cas des résistances ohmiques.

De plus, une self-induction constitue une réserve d'énergie qui a pour effet de s'opposer à toute variation brusque de régime.

Or, comme l'ont démontré les expériences de Paul Högner [1], les déformations des courbes de la différence de potentiel et du courant, dépendent dans de grandes proportions de la nature et de la valeur des résistances ohmiques ou de self-induction en série avec l'arc.

---

(1) Paul Högner. — *Elektrotechnische Zeitschrift*, 3 décembre 1908.

Digitized by Google

Enfin, Haber et Hollwech [2] ont aussi étudié la formation de bioxyde d'azote dans l'arc sous pression.

La conclusion de leurs essais fut qu'il n'était pas avantageux, au point de vue du rendement, d'augmenter la pression.

Considérations chimiques. — Un système est dit en équilibre chimique, lorsqu'il ne s'y produit plus aucune réaction. La réaction sera complète si la transformation est telle que les éléments primitifs ne s'y retrouvent plus ; elle sera incomplète si elle s'arrête avant ce terme. Dans ce dernier cas, on pourra considérer l'arrêt de la réaction comme le résultat de deux actions inverses, la vitesse de formation du corps devenant égale à celle de décomposition. Une telle réaction est dite réversible. L'étude de ces phénomènes appartient à la mécanique chimique. Appliquons la loi de Gudberg et de Waage à la formation du bioxyde d'azote, nous aurons :

$$N_2 + O_2 \rightleftarrows 2\,NO + Q_1\ (-43.200 \text{ calories}) \qquad (1)$$

Or, la vitesse de formation du NO sera proportionnelle aux masses actives des réactifs, donc à leurs concentrations en volume :

$$V_1 = k_2\,(N_2)\,(O_2) \qquad (2)$$

k_2 est un coefficient constant à une température donnée.

D'autre part, sa vitesse de décomposition est proportionnelle à sa propre concentration. On aura dans ce cas :

$$V_2 = k_1\,[NO]^2 \qquad (3)$$

k_1 étant le coefficient correspondant à cette même température. En désignant la vitesse de formation du bioxyde d'azote par la dérivée $\frac{dx}{dt}$, nous aurons :

(2) Haber et Hollwech. — *Zeitschrift für Elektrochemie*, tome XVI, 1910.

Digitized by Google

$$-\frac{dx}{dt} = k_1 [NO]^2 - k_2 [N_2] [O_2] \qquad (4)$$

L'équilibre aura lieu pour $\frac{dx}{dt} = 0$. Donc :

$$\frac{k_2}{k_1} = \frac{[NO]^2}{[N_2] \times [O_2]} \qquad (5)$$

En posant $\frac{k_2}{k_1} = K$, on pourra écrire :

$$[NO]^2 = K [N_2] \times [O_2] \qquad (6)$$

K est appelée la constante d'équilibre. Ce coefficient est constant pour une température donnée.

La pression, de même que la température, agit sur l'état d'équilibre chimique.

On peut d'ailleurs réunir leurs actions d'après le principe énoncé par Le Châtelier :

« Tout système en équilibre chimique éprouve du fait de la variation d'un des facteurs de l'équilibre une transformation dans un sens tel que si elle se produisait seule, elle amènerait une variation de signe contraire du facteur considéré. »

La réaction se faisant sans changement de volume, la constante K sera indépendante de la pression ; mais elle sera influencée par la température, ses variations étant régies par l'équation des isochores de réaction de Van t'Hoff :

$$\frac{d \lg K}{d T} = -\frac{U}{R T^2} \qquad (7)$$

qui permettra de calculer sa valeur à toute température.

(Dans la formule (7), U représente la chaleur de formation du bioxyde d'azote égale, d'après Thomsen, à -43.200 calories, R est la constante des gaz, T la température absolue, lg désigne un logarithme népérien.)

Digitized by Google

Pour la constante K, Nernst [1] a obtenu la valeur suivante :

$$(\log = \text{logarithme vulgaire})\ \tfrac{1}{2}\log K = \log \frac{x}{40{,}8\,(1 - 0{,}0152\,x)} \qquad (8)$$

et

$$\tfrac{1}{2}\log K = -\frac{4{,}726}{T} + 0{,}326 \qquad (9)$$

Haber et Kœnig ont donné des valeurs un peu différentes.

Le tableau I indique, d'après Nernst, les valeurs calculées et observées pour diverses températures des concentrations d'équilibre des gaz N O dans l'air, sous la pression atmosphérique.

TABLEAU I.

Températures.	x observé.	x calculé.
1811°	0,37	0,35
1877°	0,42	0,43
2023°	entre 0,52 et 0,80	0,64
2033°	0,64	0,67
2195°	0,97	0,98
2580°	2,05	2,02
2675°	2,23	2,35
3200°	4,43	5

Nernst a trouvé de même la durée de la demi-réaction pour diverses températures :

(1) W. NERNST. — *Gleichgewicht und Reaktiongeschwindigkeit beim Stickoxyd. Zeitschrift für Elektrochemie*, 6 août 1906.

Digitized by Google

TABLEAU II.

Températures.	k_1	k_2	Temps.
1000°	4.10^{1}	$1,74.10^{-7}$	81,62 ans
1500°	$3,73.10^{4}$	$2,33.10^{-1}$	1,26 jours
1900°	$9,06.10^{6}$	$1,20.10^{3}$	2,08 minutes
2100°	$1,40.10^{8}$	$5,55.10^{4}$	5,06 secondes
2500°	$3,37.10^{10}$	$6,98.10^{7}$	$1,06.10^{-2}$ »
2900°	$8,07.10^{10}$	$5,48.10^{10}$	$3,46.10^{-5}$ »

La vitesse de réaction s'accroît avec la température ; mais si l'équilibre est plus vite atteint, la rétrogradation est aussi beaucoup plus rapide : des chiffres exprimés dans le tableau II, il résulte que celle-ci peut-être considérée comme nulle aux environs d'une température de 1200° C.

L'égalité :

$$K = \frac{k_2}{k_1} = \frac{(NO)^2}{(N_2)\,(O_2)} \qquad (10)$$

montre que pour une température déterminée, la concentration sera maxima pour l'égalité des facteurs du dénominateur, c'est-à-dire pour un mélange égal en volume d'azote et d'oxygène. L'augmentation de rendement se calcule d'ailleurs aisément.

En partant d'un mélange d'air, on aura dès que l'équilibre sera atteint :

$$(N_2) = \left\{ 100 - (NO) \right\} \frac{79}{100} \qquad (10)$$

$$(O_2) = \left\{ 100 - (NO) \right\} \frac{21}{100} \qquad (12)$$

Substituons dans l'égalité (10) et nous aurons :

$$K = \frac{6,03\,(NO)^2}{\left\{ 100 - (NO) \right\}^2}. \qquad (13)$$

Digitized by Google

Dans le cas d'un mélange à 50 % d'oxygène et 50 % d'azote, on aura de même :

$$(N_2) = \left\{ 100 - (NO) \right\} \frac{50}{100} \tag{14}$$

$$(O_2) = \left\{ 100 - (NO) \right\} \frac{50}{100} \tag{15}$$

et de là :

$$K = \frac{4\,(NO)^2}{\left\{ 100 - (NO) \right\}^2} \tag{16}$$

Le facteur (NO), étant d'ordinaire très faible, pourra être négligé au dénominateur et les formules (10) et (11) deviennent dans ce cas :

$$NO = \sqrt{\frac{10.000}{6,03}\,K} = 40,7\sqrt{K} \tag{17}$$

$$NO = \sqrt{\frac{10.000}{4}\,K} = 50\sqrt{K}. \tag{18}$$

Le rendement théorique s'accroît donc environ de 25 %.

L'expérience confirme l'exactitude de cette hypothèse ; mais souvent on constate des augmentations supérieures et qui, selon les circonstances, varient de 10 à 60 %.

Diverses objections expérimentales sont à faire à cette théorie.

Si l'on fait jaillir l'arc en vase clos sur une masse d'air donnée, on parvient parfois à des concentrations variant de 5 à 7 %. De plus, en adoptant un refroidissement énergique des parois, Briner et Durand sont arrivés à des teneurs de 12 à 20 %.

En travaillant sous pression réduite dans un tube étroit très refroidi et avec un lent courant d'air, Haber, Koenig et Platou ont atteint des teneurs de 10 % de (NO) dans l'air et de 14,5 % dans un mélange égal d'oxygène et d'azote.

Digitized by Google

Hollwech et Koenig [1], en travaillant dans les tubes capillaires et en refroidissant une des deux électrodes, obtiennent avec un lent courant d'air des teneurs de 4 à 4,7 % de (NO) avec un rendement de 70 grammes d'acide nitrique par kilowatt-heure.

Enfin tout récemment, M. Haüsser, dans ses recherches sur la combustion de l'azote dans les explosions des mélanges gazeux, a trouvé que les quantités de bioxyde d'azote formées étaient, dans certains cas, de 100 % supérieures à celles calculées par la mécanique chimique.

Ces hautes teneurs exigent dans la formule de Nernst des températures beaucoup plus élevées que celles atteintes dans l'arc.

Pour expliquer la divergence de ces résultats, plusieurs hypothèses ont été proposées.

Haber, Koenig et d'autres y voient une action électrique, la formation du bioxyde d'azote résulterait du choc des ions et dans certains cas, les effets électriques masqueraient les effets thermiques.

Haüsser, de son côté, attribue ces hautes teneurs à une action photochimique, due à la flamme résultant de la combustion.

Briner et Durand ont envisagé le phénomène comme purement cinétique en tenant compte des propriétés spéciales des faux équilibres. Considérons, en effet, un corps de forme quelconque dans lequel l'arc jaillit. Dans les régions voisines de l'arc règnera une température voisine de 3000° et, au bout d'un certain temps, il s'établira un équilibre de température dans toutes les parties de la chambre à réaction. A l'intérieur, nous aurons donc une zone de température supérieure à 1200° et une zone de

(1) Hollwech et Koenig. — *Zeitschrift für Elektrochemie*, tome 16, 1910.

Digitized by Google

température inférieure à celle-ci et où la rétrogradation sera imposible.

Cette dernière région sera celle des faux équilibres. Or, comme toute molécule gazeuse est douée de diffusion, un certain nombre de molécules (NO) vont entrer dans cette zone, si bien que la concentration pourra y être supérieure à celle correspondant à la température mise en jeu. Cette teneur limite sera atteinte lorsque le nombre de molécules (NO) pénétrant dans la région intérieure sera égal à celui des molécules passant dans la zone des faux équilibres. Elle sera d'autant plus élevée que le refroidissement des parois sera plus effectif, ce qui agrandit en effet la région extérieure.

Mais cette théorie ne tient aucun compte des phénomènes de dissociation. Déjà Förster en 1906, et Le Blanc, en 1908, avaient expliqué les anomalies précédentes en supposant qu'aux températures élevées les molécules étaient dissociées et que la réaction se faisait entre atomes suivant l'équation :

$$N + O = NO. \qquad (19)$$

Tout récemment, M. Briner [1] a proposé une autre interprétation.

Si la réaction de l'azote et de l'oxygène était uniquement fonction de la température, le bioxyde d'azote devrait atteindre des teneurs de plus en plus élevées dans les régions de plus en plus chaudes. Or, ceci est en contradiction avec les faits, l'analyse spectrale prouvant que tous les corps existent dans les astres chauds à l'état élémentaire. Cette contradiction disparaît si l'on fait intervenir les phénomènes de dissociation, et si l'on considère

(1) Briner. — *Comptes rendus de l'Académie des Sciences de Paris.* Séance du 2 décembre 1912.

Digitized by Google

la chaleur de formation, non à partir de la molécule, mais de l'atome. Dès lors, aux hautes températures, les molécules dissociées donneront lieu à des réactions exothermiques et la concentration diminuant avec la température, la teneur passera par un maximum. Appliquée à la formation du bioxyde d'azote, on aura :

$$N_2 + O_2 = 2\,NO + Q_1, \qquad Q_1 \text{ étant négatif.} \qquad (20)$$

La dissociation étant totale, on aura de même :

$$N + O = NO + Q_2, \qquad Q_2 \text{ étant positif.} \qquad (21)$$

Aux températures intermédiaires, pour résoudre l'équilibre, il faudrait connaître les dissociation partielles de l'azote et de l'oxygène. Quel que soit le mérite de ces diverses interprétations, il est d'autres points que la théorie thermique ne peut expliquer. Il en est ainsi, notamment, de la présence du protoxyde d'azote (N_2O) parfois constatée.

D'après les expériences de Berthelot, on a :

$$N_2 + O = N_2O - 20.600 \text{ calories} \qquad (22)$$
$$N + O = NO - 21.600 \text{ calories.} \qquad (23)$$

On pourrait donc s'attendre à trouver du protoxyde d'azote dans les gaz venant des fours. Warburg et Leithäuser [1] ont, en effet, signalé la présence simultanée de protoxyde d'azote, d'anhydride azotique et d'ozone dans les produits résultant de l'action des effluves. Ces observations contredisent la théorie thermique. En appliquant les formules de la mécanique chimique, M. Camille Matignon [2] a trouvé qu'à 2,700° sous une pression de

(1) Warburg et Leithäuser. — *Physikalische Technische Reichsanstalt*, pages 313-325, 1909.

(2) Camille Matignon. — *Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris*. Séance du 22 janvier 1912.

Digitized by Google

760 mm de mercure, la pression du protoxyde d'azote formé est de l'ordre des $\frac{2}{100.000}$. Même en opérant à 3000° sous une pression de 3,000 atmosphères, on n'obtiendrait à l'équilibre qu'une quantité de N_2O correspondant à 3 atmosphères, ce qui donne un rendement de $\frac{1}{1000}$.

Étant données ces difficultés, on a proposé une théorie suivant laquelle l'oxygène, sous l'action de l'arc électrique, se polymériserait en ozone; cet ozone, se scindant ensuite, libérerait un atome d'oxygène extrêmement actif qui s'unirait à l'azote pour former le bioxyde.

Dans cet ordre d'idées, F. Fisher et Hene (1) ont admis à la suite de leurs essais que l'on obtiendrait le maximum de bioxyde d'azote si l'on faisait passer l'oxygène seul à travers l'arc électrique et si l'on y mélangeait l'azote immédiatement après. On obtiendrait, au contraire, un minimum de bioxyde d'azote si l'on faisait passer l'azote seul à travers l'arc électrique et si l'on mélangeait l'oxygène ensuite. Leurs conclusions sont très discutées à l'heure présente (2) et (3), mais si elles se vérifiaient, il en résulterait de profondes modifications dans les procédés actuels.

Mentionnons encore que J.-J. Thomson a signalé dans certains cas la formation d'azote polymérisé N^3.

(1) F. Fisher und E. Hene. — Ueber den Chemismus der Stickstoff oxydbildung im Hochspannungsbogen (*Ber. d. Chem. Ges.*, 1912, Bd. 45).

(2) A. Koenig. — Ueber den Chemismus der Stickoxydbildung im Hochspannungsbogen (*Ber d. Chem. Ges.*, Bd. 46, 1912).

(3) F. Fisher und E. Hene. — Ueber den Chemismus der Stickstoffoxydbildung im Hochspannungsbogen Mittleitung und zugleich Erwiederung auf die Bermerkungen des Herrn, A. Kœnig (*Ber d. Chem. Ges.*, Bd. 46, 1913).

Digitized by Google

De plus, R.-J. Strut [1], en faisant jaillir l'arc dans l'azote raréfié, a constaté la formation d'une luminescence spéciale qu'il attribue à la dissociation de l'azote. Cet azote [2], à l'état atomique, réagirait avec le phosphore, les métaux et le bioxyde d'azote ; mais, fait extrêmement singulier, il ne donnerait aucune réaction avec l'oxygène.

Or, F. Comte [3] a repris ces expériences et pense que cette luminescence serait due à des traces d'oxygène contenues dans l'azote (0,6 % d'oxygène suffirait).

Dans l'azote pur, cette luminescence ne se produit plus. Les expériences de Irving Langmuir semblent confirmer cette assertion, car jusqu'à 3500°, ce dernier n'a pu conclure à une dissociation appréciable pour l'azote. Le même auteur a indiqué que, sous l'action seule de l'élévation de température, l'oxygène serait en grande partie dissocié et recombiné en molécules d'ozone vers 2400°. De ces faits, on pourrait conclure que les températures réalisées actuellement dans les fours seraient trop élevées.

En résumé, on peut dire que la formation du bioxyde d'azote est un phénomène d'une nature très complexe ; mais si l'on se rappelle, d'une part, la facilité avec laquelle les rayons cathodiques provoquent les réactions, et, d'autre part, la haute aptitude réactionnelle des rayons ultraviolets, on voit qu'on peut admettre, à côté des actions thermiques prépondérantes, des effets photochimiques et électriques.

Enfin, si l'on fait jaillir un arc électrique à haute tension dans l'air liquide [4], on constate qu'il se forme autour de

(1) R. J. Strut. — *Proc. Roy. Soc.*, 1911, 1912.

(2) A. Koenig. — *Karlsruher Chemische Gesellschaft*, 12 décembre 1912.

(3) F. Comte. — Ueber die Chemische active modification des stickstoffs (*Physikalische Zeitschrift*, B. 14, 1913, p. 74-76).

(4) Synthèse de l'anhydride azoteux au moyen de l'arc électrique fonctionnant dans l'air liquide. Le *Phosphate* et la *Revue internationale des matières fertilisantes*, 24 novembre 1910.

Digitized by Google

cet arc de légers flocons bleuâtres. M. Helbig a reconnu, en séparant ces flocons de l'air liquide par distillation dans le vide, qu'ils étaient formés par de l'anhydride azoteux très pur, poudre amorphe, bleu pâle, fondant à — 111° en un liquide bleu très pur. Se basant sur cet essai, certains voudraient voir dans cette réaction l'anhydride azoteux se former en premier lieu et non le bioxyde d'azote. Cette interprétation nous paraît inexacte.

On sait depuis les expériences de Persoz, Lunge [1] et Porchnew, que si l'on fait passer un courant de bioxyde d'azote (NO) dans du peroxyde (NO^2), la formation d'anhydride azoteux (N_2O_3) est très lente à la température ordinaire. A-20°s, elle est instantanée. Ici, le bioxyde d'azote formé se trouve très refroidi et au contact de l'oxygène de l'air liquéfié, va se peroxyder. De nouvelles quantités de bioxyde se formant, on réalisera somme toute les conditions de l'expérience de Lunge et, vu la basse température à laquelle on opère, la réaction sera immédiate :

$$NO + NO_2 = N_2O_3$$

Fours électriques.

Considérations générales. — Avant d'entrer dans la description des fours électriques en usage, il paraît intéressant de donner une vue d'ensemble des idées que l'on rencontre dans les brevets pris sur la question.

Ceux-ci sont d'ailleurs extraordinairement nombreux ; c'est ainsi que M. Bourgerel [2] n'a pas relevé moins de 83 copies de brevets pris en France durant ces dix der-

(1) *Zeitschrift für anorganische Chemie*, 1894.

(2) Bourgerel. — *Moniteur Scientifique du* Dr Quesneville, septembre 1911.

Digitized by Google

nières années (1900-1911) et depuis le zèle des chercheurs n'a certes pas diminué.

Les idées émises par les inventeurs étant d'ailleurs souvent contradictoires, il n'est nullement étonnant que la plupart d'entre elles n'aient jamais reçu d'applications pratiques.

A ne considérer que les tendances principales, nous pouvons les résumer comme suit :

1) L'air est employé d'ordinaire seul dans les fours actuels ; on a cependant proposé des additions d'oxygène, de vapeur d'eau, d'ozone, d'hydrogène, d'ammoniaque et même d'argon.

2) La pression sous laquelle on l'envoie dans les fours est légèrement supérieure à la pression atmosphérique.

Muthmann et Hofer ont recommandé des surpressions, tandis que Haber et d'autres obtiennent de meilleurs résultats sous pression réduite.

3) Le courant en usage est d'ordinaire le courant alternatif, néanmoins certains appareils peuvent fonctionner avec le courant continu.

4) On utilise généralement l'arc électrique ; pour assurer sa stabilité, on intercale dans le circuit des résistances de self-induction. Dans le but d'empêcher les courts-circuits, on se sert d'un dispositif magnétique ou l'on souffle l'arc par un courant d'air.

5) Pour les électrodes, on se sert des métaux : cuivre, fer, acier et même platine. On a aussi indiqué le charbon, un mélange de charbon et de fluorure de calcium, et même des conducteurs du genre de ceux employés dans les lampes Nernst.

Étant donnée la haute température à laquelle sont soumises les électrodes, on les refroidit par une circulation d'eau intérieure.

6) Enfin, pour assurer un meilleur brassage des gaz,

Digitized by Google

certains utilisent des électrodes mobiles; d'autres réalisent la mise en mouvement des arcs produits au moyen de dispositifs magnétiques.

7) Le refroidissement des gaz a fait aussi l'objet de nombreuses recherches.

Le mélange des gaz avec d'autres déjà traités, l'emploi d'une paroi métallique froide, le refroidissement de la chambre d'oxydation sont des moyens appliqués dans ce but.

On a aussi préconisé la détente, l'injection dans les gaz d'eau ou de solution alcaline ; on a même proposé de faire jaillir l'arc dans l'air liquide.

Telles sont les considérations qui résultent de l'examen des principaux brevets pris sur la question.

Il ne faut pas oublier non plus que pour un but industriel, on doit réaliser un dispositif donnant une concentration relativement élevée en acide nitrique avec un rendement suffisant et une dépense d'énergie aussi restreinte que possible. Or, ces éléments sont antagonistes.

C'est ainsi que, si le rendement augmente avec le débit jusqu'à une certaine limite, la concentration en bioxyde formé diminue, rendant le travail de la récupération beaucoup plus difficile. Si l'on s'arrête à des débits moindres, la concentration augmentera, mais le rendement en acide nitrique sera plus faible.

Enfin, notons que la stabilité de l'arc diminue avec l'augmentation du débit gazeux, de sorte que malgré tous les avantages qui en résultent, on ne peut étendre l'arc indéfiniment.

Four Bradley-Lovejoy. — Bien que cet appareil ne fonctionne plus, nous croyons néanmoins nécessaire d'en dire quelques mots par suite de son intérêt historique.

Ce dispositif, adopté en 1902 par l'Atmospheric Products Company, utilisait comme source d'énergie les chutes du Niagara.

Digitized by Google

Il se composait d'un cylindre soigneusement isolé sur la surface intérieure duquel se trouvaient 12 rangées verticales, ayant chacune 23 pointes en platine, et relié à l'un des pôles d'une dynamo à haut voltage.

A l'intérieur, un axe rotatif portait 14 lignes verticales terminées aussi par 23 pointes en platine. Il était relié au second pôle de la source électrique.

L'axe tournait à une vitesse de 500 tours par minute, et entre les pointes rapprochées à de cours intervalles jaillissaient des arcs.

On avait ainsi 414,000 étincelles par minute, leur durée était de 0,02 seconde. Chaque arc exigeait un courant continu de 0,003 amp. sous une tension de 10,000 volts.

Le rendement atteignait 50 grammes d'acide nitrique par kilowatt-heure.

L'impossibilité d'obtenir le nitrate sans nitrite et celle de traiter plus de 18 m³ d'air par heure dans un appareil si onéreux, furent les causes pour lesquelles cette usine ferma ses portes en juin 1904.

Four Birkeland et Eyde (1) (fig. 1 et 2). — Une des caractéristiques du procédé consiste dans le soufflage magnétique de l'arc. On sait depuis Plücker que si l'on fait jaillir un arc entre deux électrodes interposées entre les pôles d'un électro-aimant, il est dévié. Tandis qu'avec le courant continu, la décharge ne s'étale que d'un côté de l'axe des électrodes ; avec le courant alternatif, elle se produit au-dessus et en dessous, et pour peu que la fré-

(1) Baud. — Industrie des acides minéraux.

H. Marchand. — Fixation de l'azote atmosphérique. (*Revue de Chimie Industrielle*, août 1909).

Montpellier. — Fixation de l'axote atmosphérique. (*Technique moderne*, avril 1910).

De La Vallée-Poussin. — Etat actuel de l'industrie du nitrate de Norwège. (*Revue générale de Chimie pure et appliquée*, janvier 1909).

Digitized by Google

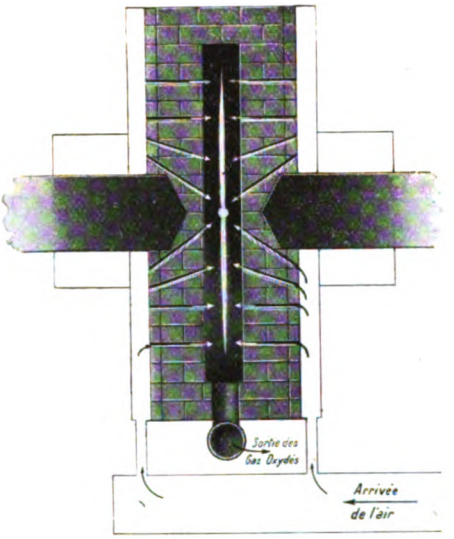


Fig. 1.

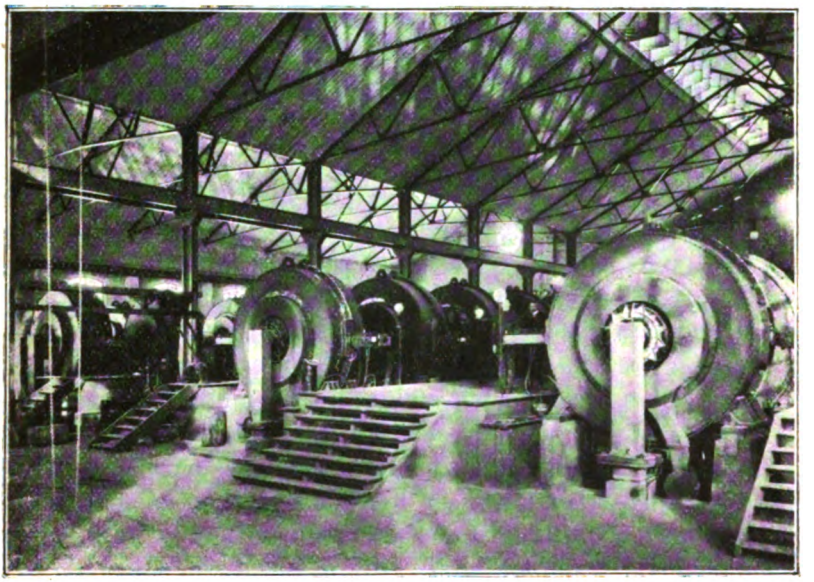


Fig. 2.

Digitized by Google

quence soit suffisante, elle donne l'image d'une immense nappe de feu (fig. 3 et 4). Dans les fours de 4,000 kwts, la flamme atteint près de 3 mètres de diamètre.

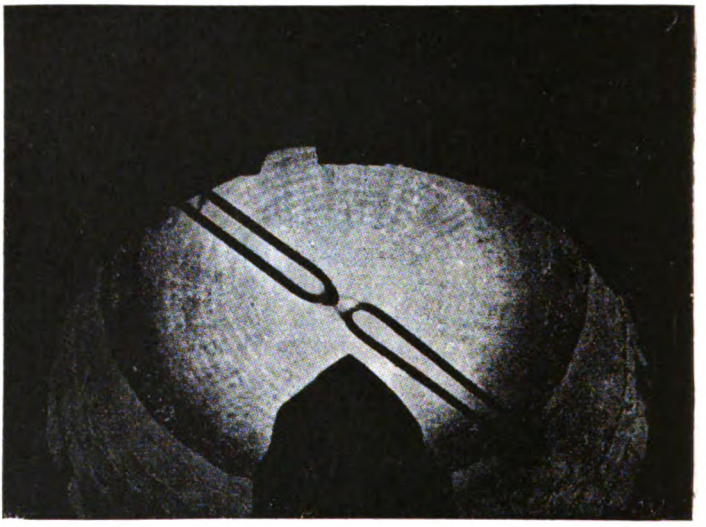


Fig. 3.

La formation de ces disques s'explique d'ailleurs facilement. Au début, entre les deux électrodes, jaillit un arc très court, très aisé à déplacer par le champ magnétique. Cet arc s'allongeant, sa résistance augmente et devient telle que la tension aux électrodes suffit pour amorcer un nouvel arc. La résistance de ce dernier étant très faible, l'arc allongé se trouve éteint. La chambre d'oxydation est constituée par un cylindre très aplati dont la hauteur n'est que de 8 à 10 centimètres. Les parois sont en matériaux réfractaires et le tout est protégé par une armature métallique. Le revêtement est percé d'une série d'ouvertures par où passe l'air avant de pénétrer dans la chambre de réaction.

Digitized by Google

De là, les gaz nitrés s'échappent par un canal collecteur périphérique. La température de la flamme atteint 3,000 à 3,500° C ; quant au refroidissement, il se produit par le mélange avec l'air en excès qui n'a pas été fortement échauffé. A la sortie, les gaz ont ainsi une température de 750° C. Les électrodes sont des tubes creux en cuivre de 1,5 cm de diamètre et dans lesquels circule l'eau de

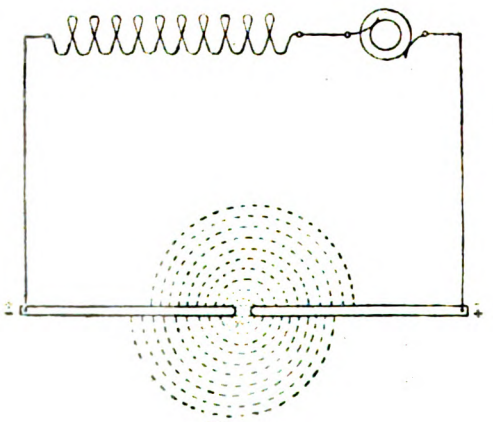


Fig. 4.

refroidissement. Elles sont placées à la distance d'un centimètre et perpendiculairement au plan des électro-aimants. Leur durée varie de trois à quatre semaines, leur remplacement demande à peine 15 minutes.

Les fours sont alimentés sous une tension de 5,000 volts. Le champ magnétique est fermé par la base et comprend 4,000 à 5,000 lignes de forces par centimètre carré au centre. Au début, les fours absorbaient une puissance de 500 kwts ; à présent, on atteint 4,000 kwts (1). L'air est débité à raison de 40 litres par kwt et par minute. la concentration en NO résultante est de 1 à 1,5 % en volume.

(1) A l'heure actuelle, un four de 6,000 kwts serait en construction.

Digitized by Google

Les revêtements, grâce à l'air en excès, ne sont pas soumis à une température supérieure à 700° C et durent de 4 à 6 mois.

Leur construction n'est pas onéreuse et ne dépasserait pas 25,000 francs pour un four de 2,000 kwts.

Ces appareils sont d'une régularité étonnante, d'une conduite aisée. Quant au rendement dans les derniers fours, il serait de 600 kgs d'acide nitrique par kwt-an.

Four Pauling (1) (fig. 5 et 6). — Ce four consiste en une espèce de cheminée rectangulaire, à l'intérieur de laquelle jaillit un arc entre deux électrodes recourbées dans le

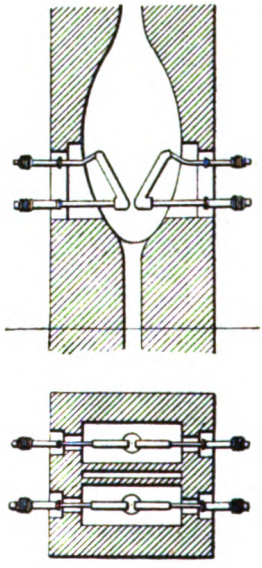


Fig. 5.

(1) H. Marchand. — Fabrication électrochimique de l'acide nitrique. Le four Pauling (*Revue de Chimie industrielle*, décembre 1909).

L'usine d'Insbrück pour la fabrication de l'acide nitrique à partir de l'azote de l'air. (*Electrochemical and metallurgical Industry*, octobre 1909).

Digitized by Google

même plan vertical, comme celles des parafoudres à cornes.

Ces électodes sont en fer et refroidies par une circulation d'eau.

La position des électrodes est réglable par des vis de pression, celle des couteaux d'allumage par une crémaillère à pignon denté. La manœuvre se fait très aisément de l'extérieur, les électrodes et les plaques de pose sont protégées par des grillages mobiles.

L'arc s'amorce dans le bas et sous l'action des courants de convection et du courant d'air sortant de la tuyère, s'étale dans le plan vertical. La succession rapide des extinctions et des allumages donne à l'arc l'aspect d'une nappe de feu, occupant la partie supérieure de la chambre d'oxydation.

Le contact de l'air et de la flamme étant bien intime, cette disposition facilite grandement les réactions.

Le refroidissement dans ce procédé est très simple. On fait arriver à la partie supérieure des gaz ayant déjà réagi et ce, à une vitesse inférieure à celle du courant venant de la tuyère. Il se produit ainsi une succion qui a pour effet d'allonger la flamme et d'assurer un bon mélange des gaz.

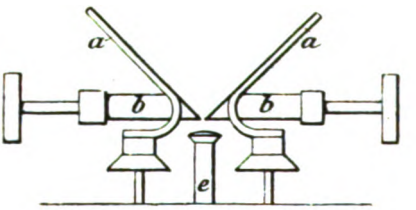


Fig. 6.

Pour l'allumage, on se sert d'électrodes auxiliaires mobiles qu'on rapproche au moment voulu. Ainsi, on peut ne disposer que d'une tension relativement faible. Tandis

Digitized by Google

que les électrodes principales ont une durée de 400 à 600 heures, celle des électodes auxiliaires est de 20 heures. Le remplacement de ces dernières demande à peine deux minutes.

Les manœuvres sont très simples, ces fours très stables et un seul homme suffit pour la conduite d'une batterie de six fours doubles, c'est-à-dire ayant chacun deux arcs.

Les deux arcs de chaque four sont montés en série et un dispositif original est utilisé pour assurer la stabilité de ces arcs. Ce dispositif est analogue à celui que l'on trouve dans les parafoudres à décharges multiples avec shunts et consiste à dériver sur l'une des paires d'électrodes une résistance ohmique convenable. Dans ces conditions, l'arc non shunté s'amorce immédiatement ; il en résulte une chute de tension par suite de l'établissement du courant, à ce moment, sur la résistance et le second arc s'amorce à son tour.

Les arcs établis, on fait arriver le vent par les tuyères et l'on diminue la résistance du shunt.

La puissance des fours varie de 400 à 1,000 kwts ; la quantité d'air traitée par heure dans un appareil de 400 kwts s'élève à 600 m^3 ; la concentration finale des gaz en NO à 1 % et 1,5 %. Le rendement moyen varie entre 500 et 600 kgs de HNO_3 par kwt-an.

Four Schönherr-Hessberger (1) (fig. 7). — « Le principe du procédé, dit M. Schönherr (2), consiste à faire circuler les gaz à traiter le long d'un arc électrique de grande longueur, brûlant tranquillement de façon que l'arc soit également environné d'une enveloppe gazeuse de gaz en circulation. L'appareil qui sert à appliquer ce principe

(1) Berntisen. — Communication faite au Congrès de Chimie appliquée de Londres : L'utilisation de l'azote de l'air, 1909.

(2) Schönherr. — Sur l'oxydation de l'azote de l'air (*Moniteur Scientifique*, du docteur Quesneville, juillet 1909).

Digitized by Google

est aussi simple que le principe lui-même ; il se compose

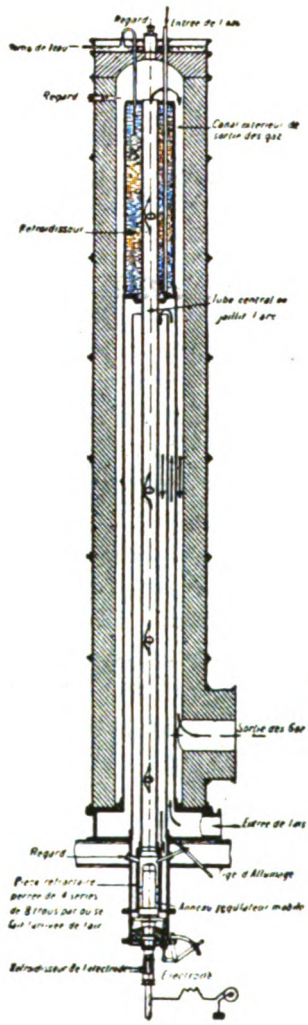


Fig. 7.

essentiellement d'un tube dans l'axe duquel brûle tranquil-

Digitized by Google

lement un long arc voltaïque environné des gaz à transformer. Le tube lui-même et le mouvement de l'air doivent être disposés de telle façon que la position de l'arc électrique ne soit pas dérangée. Il existe un mode particulier de mouvement de l'air qui remplit cette condition d'une façon particulièrement parfaite et c'est celui-ci qui a été presque exclusivement employé dans l'application industrielle de notre procédé. Ce mode de déplacement, c'est le mouvement en tourbillon. Tout le monde connaît la puissance terrifiante des cyclones qui dévastent avec une effrayante régularité certaines régions de la terre. Les cyclones se déplacent pendant de nombreux kilomètres sur certaines régions en renversant tout ce qu'ils rencontrent. Rien ne peut résister à leur effort et, cependant, il existe à leur centre une zone tranquille qui se déplace avec eux. C'est ce phénomène que nous avons utilisé. Nous produisons dans nos tubes un tourbillon semblable de petite dimension et nous laissons brûler l'arc électrique dans son centre dans la région tranquille. Les particules d'air progressent tout autour de l'arc d'un mouvement spiraliforme et sont ainsi renouvelées comme on le désire. Par ce moyen, on peut obtenir un arc voltaïque fixe et tranquille d'une longueur presque arbitraire ».

Cependant, comme l'a fait remarquer M. Ph. A. Guye, l'arc se maintient aussi bien quand l'air pénètre librement par le bas. La stabilité, selon lui, résulterait surtout de l'augmentation de la viscosité des gaz avec la température.

L'électrode est un tube en cuivre refroidi, isolé électriquement de la masse du four et relié à l'un des pôles d'une source électrique à haute tension. Au centre se trouve un noyau en fer de hauteur égale et qu'on peut remplacer aisément. La durée de ce noyau serait 2,000 heures, son remplacement demanderait 15 minutes.

La seconde électrode est constituée par un tube vertical

Digitized by Google

en acier dont la longueur varie suivant la puissance absorbée et qui est relié électriquement à la masse métallique du four.

Pour l'allumage, on provoque un court-circuit entre l'électrode et le tube au moyen d'une baguette. Par suite de la pression exercée par l'air, l'arc s'allonge jusqu'au sommet. Pour éviter la détérioration des points d'attache supérieurs, on établit en cette partie du tube une circulation d'eau. Ce dispositif est très efficace, car on ne change la partie supérieure que tous les 4 mois. La tension de l'arc varie entre 5,000 et 7,000 volts suivant sa longueur. Trois regards vitrés permettent de surveiller le fonctionnement du four.

Le mouvement tourbillonnant de l'air se fait très aisément, en introduisant l'air tangentiellement. Le réglage de ce débit se fait à la main. L'air entrant dans le four s'échauffe au contact du tube et pénètre dans la chambre d'oxydation. A la sortie, la température des gaz est de 1200°, température à laquelle aucune dissociation ne se produit plus.

Voici, d'après M. Schönherr, l'utilisation de l'énergie dans son appareil :

3 % sont utilisés pour la formation des oxydes d'azote ;

40 % de la chaleur produite par l'arc sont absorbés par l'eau de refroidissement ;

17 % de cette même chaleur sont perdus par rayonnement ;

30 % sont entraînés par les gaz chauds qui l'abandonnent aux chaudières à vapeur ;

10 % sont entraînés par les gaz chauds et sont perdus dans les réfrigérants.

Enfin une particularité très intéressante du système est l'obtention d'un facteur de puissance élevé : 0,92 à 0,96. Les courbes de tension et de courant obtenues dans ce

Digitized by Google

four sont pour ainsi dire sinusoïdales, contrairement à ce qui se passe pour la lampe à arc et le four Birkeland et Eyde et ce qu'indiquent nettement les courbes ci-dessus (fig. 8).

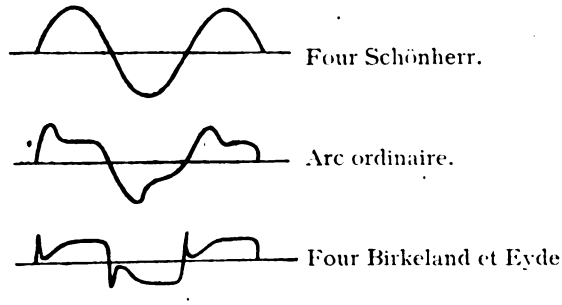


Fig. 8.

Le principal avantage du four de la Société Badoise sur le four norwégien est un rendement supérieur en oxyde d'azote.

Mais il est d'une constance moins parfaite et d'une conduite plus difficile et plus cher à construire.

Des types absorbant des puissances de 1,000 kwts fonctionnent à l'heure présente.

Four Guye (1) (fig. 9). — Nous avons signalé en plus d'un endroit les remarquables travaux de M. Ph. A. Guye, exécutés en collaboration avec MM. C. E. Guye et Naville, travaux qui ont d'ailleurs servi de base à plus d'un inventeur.

Après avoir pris différents brevets sur la question et étudié plusieurs systèmes, ils se sont arrêtés au type suivant :

Plusieurs arcs avec électrodes à cornes sont montés en série sur le même circuit électrique. Il en résulte par

(1) Ph. A. Guye. — Op. cit.

Digitized by Google

suite une stabilité beaucoup plus grande, chaque arc ayant pour résistance l'ensemble de la résistance des autres. Au-dessus des électrodes se trouvent des cheminées parallèles de section réduite, afin que la chambre d'oxydation soit bien remplie par l'arc. Il en résulte un mélange bien intime des gaz et de l'arc, condition favorable à la production de bioxyde d'azote.

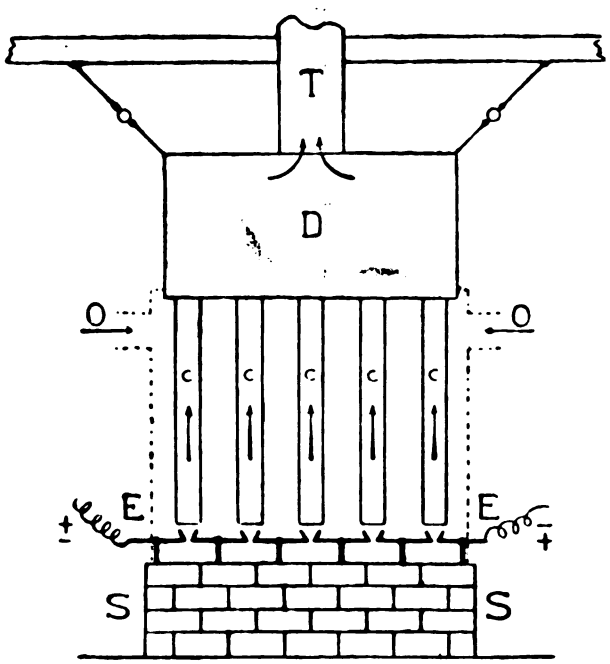


Fig. 9.

De plus, on peut disposer aisément un système refroidisseur pour abaisser la température des gaz à leur sortie de la chambre de réaction et éviter ainsi que la dissociation se continue.

Le développement des arcs est extraordinairement

Digitized by Google

intense ; c'est ainsi qu'un four de 5 kwts donne la même

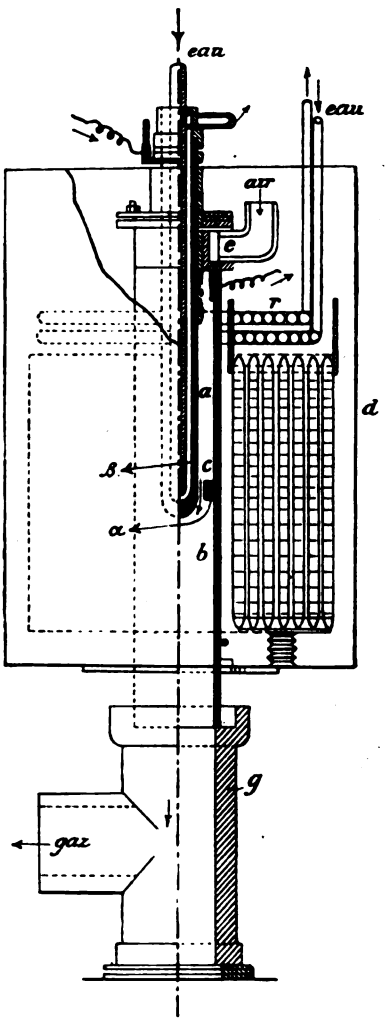


Fig. 10.

longueur totale d'arc que le four de 600 HP de la Badische Anilin und Soda Fabrik.

Digitized by Google

Autres avantages à signaler, le système peut fonctionner moyennant de petites modifications, à l'aspiration comme au refoulement, et jouit de la plus grande élasticité en ce qui concerne les conditions de fonctionnement. Les procédés Guye sont acquis par la Société le « Nitrogène et la Société française métallurgique de Froges ». Dans une usine d'essai aux environs de Genève, ce four a donné, en 1910, un rendement de 600 kgs d'acide nitrique par kilowatt-an.

Four Moscicki (1) (fig. 10). Dans ce système les électrodes sont concentriques et la rotation de l'arc est produite par un dispositif magnétique.

L'électrode extérieure consiste en un cylindre en cuivre de 15 cm de diamètre, fixé à sa base dans une monture en argile et logé dans un compartiment cylindrique étanche *d* de 80 cm de diamètre et enveloppant le tout.

L'électrode centrale est un tube de 6 cm de diamètre à circulation d'eau fixée dans une monture en porcelaine à la partie supérieure et par où arrive le courant.

Le champ magnétique est produit par une bobine dont l'axe coïncide avec celui des électrodes. En raison de la forme concentrique de celle-ci, l'arc prendra un mouvement de rotation rapide. L'air venant par *e* empêchera, d'ailleurs, la flamme de monter dans toute la section. Le réservoir est rempli d'huile, son but est d'assurer un isolement parfait, ainsi que le refroidissement de la deuxième électrode.

Enfin, une circulation d'eau *r* maintient le bain lui-même à basse température.

---

(1) H. Marchand. — Op. cit.

Delmarcel. — La fabrication électrochimique de l'acide nitrique, des nitrates et nitrites, au moyen des éléments de l'air (*Annuaire des Ingénieurs sortis des Ecoles Spéciales de Louvain*, 1910).

Digitized by Google

Pour l'allumage, le tube extérieur présente à une certaine hauteur une petite saillie α, ce qui diminue la distance entre les deux électrodes et par suite la tension nécessaire pour l'amorçage de l'arc. Signalons aussi que M. Moscicki a imaginé un autre procédé d'allumage. Pour ce, il élève la tension au moyen d'un petit transformateur, mais dans ce cas, il n'y a pas de pièce auxiliaire.

Pour une distance de 15 mm, entre la saillie et l'électrode centrale, l'amorçage demande une tension de 3,000 volts ; le courant est alternatif à 50 périodes et réglé par une résistance inductive. Grâce au mouvement continuel de la flamme, on peut donner au tube une section assez restreinte, de façon à ce que l'arc remplisse bien la chambre de réaction, condition favorable à la production de gaz nitreux.

La température de sortie des gaz serait en deçà de 1,200° C. Le rendement serait de 60 grammes d'acide nitrique par kw/heure, ce qui correspond à 525 kgs d'acide nitrique par kw/an.

Ce four permet aussi l'utilisation des courants continus.

D'après M. Mosciki, une tension de 1,500 volts suffirait dans ce cas et le four pourrait fonctionner sans appareils spéciaux dans le circuit, à condition qu'il soit connecté aux bornes d'une dynamo compound.

Les apparcils Moscicki sont en essais industriels à la Compagnie de l'Aluminium de Neuhausen, à Chippis dans le Valais.

Les résultats économiques, à ce qu'il paraîtrait, laisseraient quelque peu à désirer.

Jusqu'à présent, 3 % de l'énergie sont seulement employés pour la formation des gaz nitrés. Tandis qu'à 3,000-3,500° correspond une concentration théorique de 4,5 à 5 % de NO en volume ; en réalité, elle reste toujours inférieure à 1,5 ou 2 %.

Digitized by Google

Le rendement sera vraisemblablement amélioré en augmentant la puissance unitaire des fours et en diminuant la rétrogradation par un refroidissement plus efficace.

Dans cet ordre d'idées, il convient de signaler à nouveau les essais de Briner et Haber, qui obtinrent des concentrations élevées en bioxyde d'azote en opérant sous pression réduite et avec des arcs très refroidis.

Dans une autre voie, une cause d'amélioration sera le travail en cycle fermé avec un mélange suroxygéné.

L'oxygène supplémentaire proviendrait de la distillation de l'air liquide, quant à l'azote en excès, il servirait à la fabrication soit de l'ammoniaque synthétique par l'un des procédés décrits, soit de la cyanamide par le système Frank et Caro, soit du nitrure d'aluminium par le procédé Serpeck.

D'ailleurs, le travail en cycle fermé avec mélange suroxygéné est déjà appliqué dans les usines exploitant les brevets Auzies ; l'oxygène est utilisé à la préparation catalytique du bioxyde d'azote ; l'azote en excès, à la préparation d'ammoniaque.

Le prix de revient du kilogramme d'azote fixé dans ce cas serait inférieur à fr. 0,45.

De grands progrès peuvent être réalisés, et le professeur Ph. A. Guye prévoit dans l'avenir un rendement de 1 tonne d'acide nitrique par kw-an.

PEROXYDATION DES PRODUITS NITREUX.

A la sortie des fours les gaz dont la température varie de 1000° à 1200°C passent d'abord sous des chaudières, puis pénètrent à 200-250° C dans des appareils refroidisseurs, où ils sont ramenés aux environs de 100° C.

De là, ils vont aux tours d'oxydation et de récupération.

Digitized by Google

Ainsi qu'il résulte des expériences de Richardson [1], la décomposition du peroxyde d'azote suivant l'équation :

$$2\,NO_2 = 2\,NO + O_2$$

commence aux environs de 170° C et est complète à 620° C sous 760 mm de mercure. C'est donc à partir de 600° C que le bioxyde d'azote pourra commencer à se peroxyder. On aura les réactions :

$$NO + O = NO_2 \qquad (1)$$
$$NO_2 + NO = N_2O_3 \qquad (2)$$
$$2\,NO_2 = N_2O_4 \qquad (3)$$

La polymérisation du peroxyde d'azote suivant l'égalité (3) commence en deçà de 130° C. Ainsi que l'ont montré E. et L. Nantanson [2], la quantité de N_2O_4 est d'autant plus grande que la pression de N_2O_4 dans le gaz est plus forte et la température plus basse.

D'après M. Ph. A. Guye, pour une teneur de 1 % de bioxyde d'azote en volume, la composition du gaz à la température ordinaire serait la suivante :

10 à 20 %	seraient	à l'état	de gaz	NO.
70 à 75 %	»	»	»	NO_2.
8 à 10 %	»	»	»	N_2O_4.

Quant au pourcentage des gaz en anhydride azoteux, il est très faible, comme le prouve l'expérience de Lunge.

La vitesse de peroxydation du bioxyde d'azote est directement proportionnelle à sa teneur dans les gaz venant des fours. D'après M. Bernthsen, pour une teneur de 2 % le temps nécessaire à l'oxydation serait 12 secondes pour 50 % et 100 secondes pour 90 %.

(1) NERNST. — *Traité de Chimie*, tome II, page 19.
(2) E. L. NANTANSON — *Wiedemanns Annalen*, 1886.

Digitized by Google

D'autres moyens ont été proposés pour activer la peroxydation du bioxyde d'azote.

Les études de D. Berthelot et de H. Gaudechon [1] sur l'action des rayons ultra-violets ont montré que ceux-ci augmentaient considérablement la vitesse de réaction.

Les usines exploitant les brevets Auzies poursuivraient des essais dans ce sens.

RÉCUPÉRATION DES OXYDES D'AZOTE.

La récupération des produits nitreux, étant donnée leur grande dilution, est une des plus délicates questions de la technique chimique.

L'absorption repose sur l'application des principes suivants. A l'heure présente [2], on admet en général que c'est sous la forme polymérisée N_2O_4 que les gaz nitrés réagissent soit avec l'eau, soit avec les solutions basiques.

Les équations ci-dessous se produiront donc :

$$N_2O_4 + 2\,N_aOH = N_aNO_3 + N_aNO_2 + H_2O \quad (4)$$

$$N_2O_4 + H_2O = HNO_3 + HNO_2 \quad (5)$$

L'acide nitreux (1) étant instable va se décomposer :

$$3\,HNO_2 = HNO_3 + 2\,NO + H_2O \quad (6)$$

En vertu de l'équilibre chimique :

$$2\,NO_2 \rightleftarrows N_2O_4$$

une nouvelle quantité de N_2O_4 se produira ; mais sa tendance à la dissociation augmentant avec la diminution de sa pression, il arrivera un moment où cette régénération deviendra impossible.

(1) D. Berthelot et H. Gaudechon. — *Compte rendu de l'Académie des Sciences de Paris*, Séance du 6 juin 1910.

(2) Ph. Guye. — Op. cit.

Digitized by Google

Dès lors, l'absorption ne pourra plus se faire que sous la forme nitreuse et conformément aux réactions suivantes :

$$NO_2 + NO + H_2O = 2\,HNO_2 \qquad (7)$$

$$NO_2 + NO + 2\,NaOH = 2\,NaNO_2 + H_2O \qquad (8)$$

Enfin, la réaction signalée par Gay Lussac pourra aussi se produire :

$$4\,NO + 2\,NaOH = N_2O + 2\,NaNO_2 + H_2O \qquad (9)$$

Ces quelques considérations démontrent *a priori* l'impossibilité de réaliser l'absorption complète par l'eau seule et la nécessité d'employer pour la fixation des gaz de queue des solutions alcalines.

Acide nitrique. — En sortant des appareils de peroxydation, les gaz passent dans une ou plusieurs tours remplies de morceaux de quartz ou autres matériaux inattaquables où l'on établit une circulation d'eau inverse de celle des gaz.

On obtient ainsi à la base de la première tour un acide d'une teneur de 25 à 35 %.

On doit ensuite le concentrer ; la conduite de cette opération étant assez difficile, on a préconisé l'addition de plusieurs déshydratants.

C'est ainsi que l'on a proposé l'emploi de l'acide sulfurique et du bisulfate de soude.

On fait aussi passer les vapeurs nitriques et eau sur du sulfate de sodium ou de calcium anhydres qui retiennent l'eau.

D'autres, comme Boeters et Wollfenstein, distillent l'acide nitrique avec du nitrate de chaux anhydre. Quant à la régénération de ce dernier, elle est très aisée.

De son côté, Eberhard Brauer utilise l'action déshydratante des acides arsénique ou phosphorique. L'absence de composés solides dans cette concentration constitue d'après l'auteur un perfectionnement important.

Digitized by Google

Quant au procédé de la Salpetersaüer Industrie Gesellschaft de Gelsenkirchen, il se distingue par son originalité.

On soumet l'acide à concentrer à l'électrolyse. Le bioxyde d'azote formé à la cathode est conduit autour de l'anode de façon à être oxydé par l'oxygène qui se dégage autour de cette anode.

Le bioxyde est refroidi avant d'être dirigé sur l'anode de façon à augmenter sa solubilité dans l'acide azotique. Toutefois, ce procédé est abandonné à l'heure actuelle.

Nitrites. — Pour obtenir du nitrite seul, la Badische Anilin und Soda Fabrik opère comme suit :

On traite les gaz venant du four par un lait de chaux ou de soude à une température telle que la quantité de peroxyde d'azote soit égale à celle de bioxyde.

Dans ces conditions, la réaction se fait suivant l'égalité (8) et l'on obtient seulement du nitrite.

La Société le Nitrogène proconise dans le même but le moyen suivant :

L'absorption des gaz nitreux par les lessives alcalines et alcalino-terreuses conduit à la production de nitrites et de nitrates de séparation peu aisée par des cristallisations successives. On se sert d'un lait de chaux et l'on traite le mélange obtenu de nitrates de chaux et de nitrites de chaux par du sulfate de potassium et du sulfate de sodium, de façon à avoir du nitrate de potassium et du nitrite de sodium. On filtre, et les solubilités des deux corps étant très différentes on les récupère aisément par cristallisation.

Dans ce cas, on pourrait, au lieu d'un lait de chaux, se servir d'une solution de KOH et de $NaOH$, ces éléments s'y trouvant en proportions telles que l'on ait uniquement du nitrate de potassium et du nitrite de soude. Ces quantités devraient être déterminées par l'expérience.

La Société Norwégienne de l'Azote produit aussi du

Digitized by Google

nitrite pur. Le mélange de nitrite et de nitrate de sodium est additionné d'acide nitrique.

Les gaz nitreux provenant de la décomposition peuvent ou bien être réoxydés ou bien additionnés d'un peu d'air, être soumis à l'action absorbante d'une solution alcaline. Dans ce dernier cas, le produit résultant est du nitrite pur, la réaction se faisant suivant l'équation (8).

Nitrates de chaux. — L'application du procédé Schloesing [1] permet la récupération directe des oxydes d'azote sous forme de nitrate de chaux sans nitrite. L'air se dépouille de ses gaz nitreux par son passage dans des chambres remplies de morceaux de chaux maintenus à une température de 300° à 400°C.

L'absorption est méthodique et s'accomplit d'une façon intégrale. La chaux employée doit être poreuse et légère. Pour la préparer on l'éteint à fond, on en fait des agglomérés qu'on déshydrate à une température peu élevée.

Cette méthode donne du nitrate de chaux pur titrant 15 % d'azote. De plus, tandis que dans le procédé par voie humide, on ne recueille que les 98 % de l'azote oxydé, dans ce cas la totalité de ce gaz est fixée.

Superphosphates nitrés. — Dans les derniers temps, plusieurs brevets ont été pris pour fixer les gaz nitreux par des phosphates.

On obtient ainsi des produits à haute teneur en acide phosphorique et en azote, produit du plus haut intérêt pour l'agriculture.

Fixation des oxydes d'azote par le froid. — Enfin, on a recommandé de fixer les oxydes d'azote par le froid.

Dans son procédé, l'Elektrochemische Werke refroidit les gaz, peroxydés au préalable, à 10°C ; dans ces conditions, il se sépare de l'acide nitrique. Dans un second

(1) Schloesing. — Op. cit.

Digitized by Google

stade, la température est abaissée à — 30°, — 40° C ; puis dans un troisième récipient, on arrive à — 65° C. A cette température, le peroxyde d'azote se sépare sous forme solide. Les gaz sortant servent à la production du froid dans les deux premiers appareils.

D'après l'inventeur, il y aurait avantage à dessécher

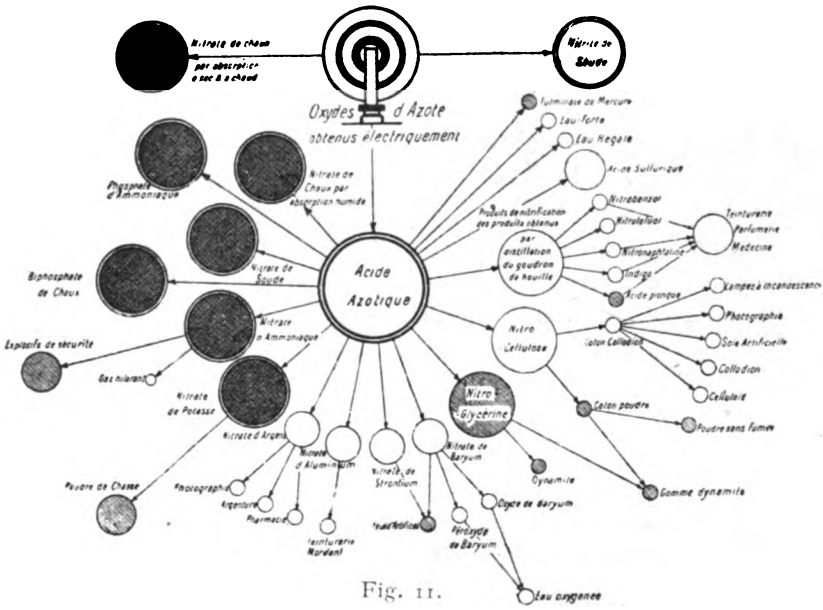


Fig. 11.

l'air qu'on doit traiter et à éviter ainsi le premier dépôt d'acide nitrique.

Dans un brevet plus récent, Ramsay propose de combiner ce refroidissement avec la liquéfaction de l'air ; celle-ci fournirait, dans ce cas, des mélanges suroxygénés.

Le peroxyde d'azote ainsi liquifié trouverait emploi dans nombre d'opérations chimiques.

Produits dérivés. — En plus des divers produits signalés ci-dessus, il existe une foule d'autres dérivés sur lesquels

Digitized by Google

nous reviendrons dans la suite. Ils sont d'ailleurs condensés sous une forme remarquable dans le tableau synoptique emprunté à l'ouvrage de M. de La Vallée-Poussin : « Le salpêtre et les chutes d'eau de Norwège », 1912 (fig. 11).

Le champ d'application de l'acide nitrique est immense, ce qui rend considérable la portée de la solution économique de cette question [1].

INSTALLATIONS.

Installations norwégiennes [2]. *Usines Birkeland & Eyde et Schönherr.* — Peu de pays offraient une situation aussi favorable au développement de la nouvelle industrie que la Norwège. Tout le long de la côte occidentale courent les Alpes Scandinaves, où se dépose l'humidité des vents tiédis au contact du Gulf Stream, causes d'abondantes précipitations d'eaux météoriques. La mer étant proche, les hautes chutes y sont fréquentes, et la régularisation du débit y est singulièrement aidée par l'existence de grands lacs. Aussi le concours de tant de circonstances heureuses a-t-il eu pour effet d'abaisser à une très faible valeur le prix du cheval installé.

Usines chimiques de Nottoden. [3]. — Ces usines furent

(1) Mentionnons encore le brevet récent de Ph. A. Guye, G. Darier et A. Van Vloten.

Ces auteurs traitent des chlorures alcalins, ou alcalino-terreux, par de l'acide nitrique à 35 % au maximum. Ils opèrent à une température de 80° et sous une pression inférieure à 300 mm. En amenant les vapeurs en présence du chlorure solide, il y a production de nitrate alcalin ou alcalino-terreux et d'acide chlorydrique. Brevet américain n° 1.036.896. 27 août 1912.

(2) L. de La Vallée-Poussin. — Le salpêtre et les chutes d'eau de Norwège (1912).

(3) Samuel Eyde. — Oxydation of Atmospheric Nitrogen and Deve-

Digitized by Google

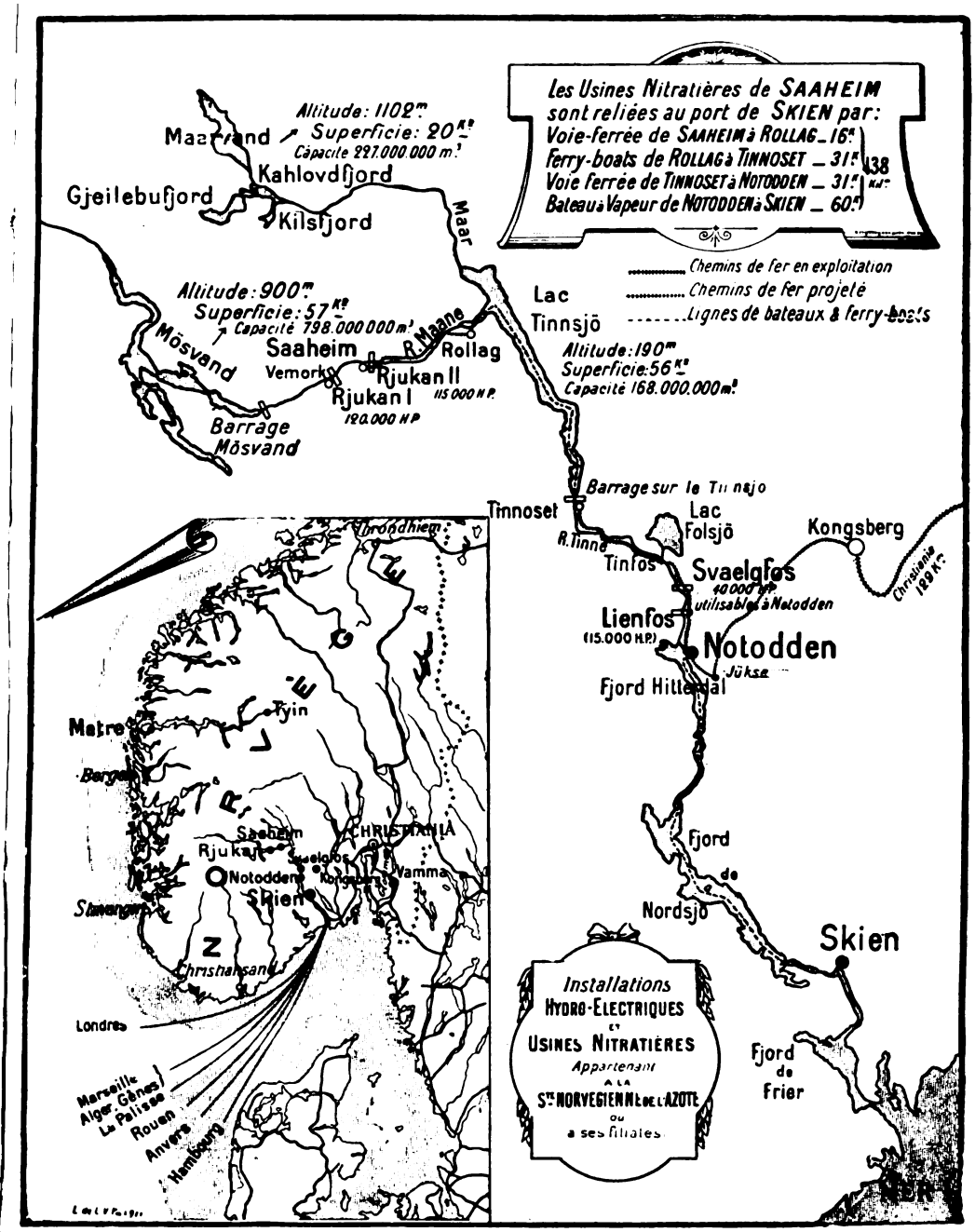


Fig. 12.

Digitized by Google

installées en 1905 pour l'exploitation du procédé Birkeland-Eyde, avec le concours financier de la Banque de Paris, par la Société Norwégienne de l'Azote. Elles utilisent l'énergie produite aux stations de Svaelgfos, de Lienfos et de Tinfos (fig. 12). La chute de Svaelgfos est alimentée par la Tinné qui sort du lac Tinnsjö, où viennent se jeter la Maana et la Maar. Le débit de la Tinné est actuellement de 75 m^3 à la seconde, mais après la régularisation du cours de la Maar (on construit dans ce but un barrage à Tinnos et sur le lac Tinnsjö), il sera de 90 m^3 à la seconde. L'usine de Svaelgfos utilise une hauteur de chute maxima de 46 m 50. Quatre turbines à doubles couronnes mobiles, pouvant développer 10.000 HP chacune, sont accouplées directement avec quatre alternateurs. Ces derniers donnent du courant triphasé, d'une fréquence de 50 périodes par seconde et d'une intensité de 600 ampères par phase.

Ils fournissent le courant à la ligne sous une tension de 10.000 volts. La puissance développée normalement est de 10.500 kv A avec un cos φ moyen de 0,65. Le courant est envoyé à Nottoden, situé à une distance de 5 kilomètres, par quatre lignes ayant chacune six câbles d'une section de 120 mm^2. La section totale est donc de 2880 mm^2. Le courant d'excitation est fourni par deux dynamos shunts de 360 kwts. Le tableau de distribution s'étend sur 3 étages de hauteur et est construit en matériaux incombustibles.

La chute de Lienfos et celle de Tinfos actionnent aussi l'usine de Nottoden.

A Lienfos, en marche depuis novembre 1911, il y a quatre turbines d'une puissance de 5,150 chevaux fonctionnant avec un rendement de 80 % environ.

---

lopment of Resulting Industries in Norway. Communication faite au Congrès International de New-York 1912.

L'usine électrique de Nottoden. — *Electrical Review*, 30 décembre 1910.

Digitized by Google

Elles sont accouplées à 4 alternateurs triphasés donnant du courant à 50 périodes par seconde, 380 ampères par phase et sous une tension de 10,000 volts. La puissance développée normalement est 6,600 kv-A avec un cos $\varphi = 0,6$. Les turbines et alternateurs ont été ici aménagées pour l'utilisation du débit de 90 m³ par seconde.

L'usine de Tinfos fut construite en 1903 ; c'est elle qui actionna les premiers fours de Nottoden. Sa puissance est de 2,500 chevaux.

Enfin, en 1914, après la régularisation du cours de la Maar et l'aménagement de l'usine de force de réserve de Svaelgfos qui comprendra deux groupes d'unités de 10,000 HP chacun, on disposera à Nottoden :

Svaelgfos déjà en opération	47,000	HP
Lienfos » »	16,900	»
Tinfos » »	2,500	»
Usine de force de réserve de Svaelgfos	20,000	»
Aarlifos, location projetée.	10,000	»
Total	96,400	HP

A l'heure présente, les usines chimiques de Nottoden disposent de 57,500 chevaux. L'utilisation de cette énergie se fait uniquement dans des fours Birkeland-Eyde absorbant une puissance variant de 850 à 4,000 kw.

La Société Norwégienne de l'Azote possède aussi la chute de Vamma située sur le Glommen. Elle y achève en ce moment un grand barrage et construit une usine hydroélectrique d'une puissance de 74,000 chevaux. Cette usine est prévue pour un débit moyen de 285 m³ par seconde avec une hauteur de chute de 26 m. La municipalité de Christiana s'est réservée le droit d'utiliser une partie de cette énergie, si bien que la quantité disponible pour la fabrication électrochimique ne sera que de 57,000 chevaux.

Digitized by Google

Usines de Christiansand. — De 1905 à 1907, les particularités des fours Schönherr avaient été étudiées à la Badische Anilin und Sodafabrik, à Ludwigshafen. Pendant l'automne 1908, la Société installa une usine d'essai de 2,000 HP à Christiansand.

Les fours consommeraient 600 chevaux chacun, et la plus grande partie des gaz nitrés serviraient à la production de nitrites.

Usines de Saaheim. — En 1907, la Société Norwégienne de l'Azote a conclu une entente avec la Badische Anilin und Sodafabrik à Ludwishafen, la Farbenfabrik vormals Fr. Bayer à Elberfeld et l'Aktiengesellschaft für Anilinfabrikation à Treptow, près de Berlin, pour la mise en valeur des autres chutes norwégiennes.

Les deux groupes s'entendaient pour l'exploitation de leurs brevets en commun et l'on aboutit à la création de deux nouvelles sociétés :

1° La Société norwégienne de Forces (pour la production de la force motrice) ;

2° La Société norwégienne des Usines nitratières.

La Société des Forces dispose des chutes du Rjukan, de Tyin et de Matre.

La chute de Rjukan est alimentée par la Maana, rivière sortant du lac Mösvand, muni d'un barrage et d'une capacité de 800 millions de m^3. La prise d'eau est à 10 km du lac et un tunnel de 4 km de long et de 30 m^2 de section amène les $47m^3$ par seconde à un château d'eau.

La hauteur totale de chute est de 560 m. ; la chute a été divisée en deux parties, la première est utilisée, la seconde en aménagement. Le débit de la Maana régularisé est de 47 m^3 par seconde et l'eau est amenée par dix conduites forcées à des turbines doubles du type Pelton.

Celles-ci sont telles qu'avec le débit d'eau maximum de $5m^3 22$ et une chute de 282 m., la turbine correspondante

Digitized by Google

peut fournir 19,600 chevaux ; avec 80 % de rendement elle donne 15,700 chevaux au manchon d'accouplement avec les alternateurs correspondants.

Les régulateurs de vitesse agissent par l'intermédiaire de sérvo-moteurs à huile. Il existe d'autres régulateurs de pression ouvrant un canal de fuite dès que la pression dépasse une certaine limite dans les conduits. Ces turbines ont été construites par les maisons Kvaemer Brug, de Christiania, Esscher Wyss de Zurich, et Voith d'Heidenheim Brenz.

Quant aux alternateurs ils sortent des ateliers de l'Allmänna Svenska et de la Brown-Boveri. Ils sont établis pour donner 17,000 kv-A avec un cos φ de 0,6. Le courant triphasé produit est à 50 périodes et a une tension de 10,000 volts. Ici, toutes les excitatrices sont montées en bout d'arbre, disposition plus favorable au point de vue de la sécurité. Une partie des alternateurs est construite en deux moitiés pouvant débiter chacune 8,500 kv-A, travailler ensemble ou séparément. La ventilation est énergique et l'air chaud peut déboucher au besoin dans le canal d'amenée de l'air frais pour y fondre la neige entraînée en hiver.

Dans les machines de l'Allmänna Svenska, les stators sont formés de tôles de 0,35 mm. d'épaisseur, divisées en 16 paquets avec 15 intervalles de 10 mm.

Le diamètre intérieur du fer est de 4,150 mm., le diamètre extérieur atteint 4,800 mm. Les enroulements sont à 3 rainures par pôle avec 4 conducteurs par rainure.

Chaque conducteur est placé entre 2 gaînes de micanite inclinées l'une sur l'autre, de façon à former un fourreau dont les bords sont soudés ensemble par cuisson.

Les conducteurs ainsi préparés sont recouverts d'un tube en micanite et tous les intervalles sont remplis de gomme laque. Ainsi la présence d'air est évitée et il ne

Digitized by Google

peut y avoir production d'ozone, si dangereuse pour les bobinages à haute tension.

Le rotor se compose de deux parties, la partie intérieure en acier coulé forme le moyeu et les bras. La partie extérieure portant les pôles se compose de 4 segments en acier coulé de peu d'épaisseur, fixés à chaud sur les bras et capables de supporter sans déformation un effort supérieur de 25 % à celui qui s'exercerait à l'emballement complet de la turbine.

Le poids total d'une machine est de 248 tonnes, celui de la partie tournante 93 tonnes.

Dans les stators de la Brown Boveri le fer actif comprend 15 paquets de tôles de 0,5 mm. avec intervalles de ventilation de 10 mm.

Le diamètre intérieur du fer est de 4,400 mm., le diamètre extérieur 5,000 mm.

Le bobinage à 4 rainures par pôle et 3 conducteurs par rainure comprend des bobines symétriques semblables, placées dans des rainures ouvertes de façon à obtenir une courbe de force électromotrice la plus régulière possible et à diminuer l'élévation de température.

Dans le rotor le moyeu et les bras sont des pièces coulées. Chaque couronne polaire se compose de six segments en acier forgé, rapportés à chaud sur les bras en formant deux groupes de trois segments solidaires.

Quant aux pôles, ils sont fixés par des ajustages en queue d'aronde. Le poids du rotor est de 90 tonnes.

Le graissage se fait sous pression. De plus, les paliers sont munis d'un refroidissement par circulation d'eau.

Un graissage supplémentaire comprenant quatre bagues ordinaires est prévu comme secours et en cas d'arrêt des pompes à huile peut permettre la marche pendant une heure.

L'usine chimique de Saaheim se trouve à 4,650 m. de là.

Digitized by Google

Les lignes sont constituées par 60 câbles répartis en 10 lignes doubles. Chaque ligne correspond à l'une des 10 génératrices et est susceptible de transporter 17,000 kwts. Sur les 1,650 premiers mètres, les câbles sont en cuivre ; sur les 3,000 derniers, en aluminium.

A l'usine électrochimique de Saaheim fonctionnent des fours Birkeland de 3,000 kwts et des fours Schönherr de 1,000 kwts. L'énergie utilisée est de 120,000 chevaux.

L'usine de Saaheim est reliée au lac Tinnsjö par une voie ferrée qui aboutit à Rollag, le transport s'opère ensuite par ferryboats sur le lac Tinnsjö, long de 40 km, pour arriver à Tinnoset. Une seconde voie ferrée va de Tinnoset à Nottoden. De là, on arrive en bâteau au port de Skien.

La seconde partie des chutes de Rjukan sera aménagée en 1914. Un tunnel de 5 km. de longueur et 30 m² de section amènera les eaux à la chute inférieure et l'énergie captée sera de 107,000 chevaux.

Stations de Matre et Tyin. — Plus au Nord, se trouvent les chutes de Matre comportant deux parties de débits presque constants. La première a un débit de 9 m³ par seconde avec une hauteur de chute de 315 m. ; la seconde de 10 1/2 m³ sous 487 m.

Les usines, au pied de la chute, recevront une puissance de 80,000 chevaux et les navires de haute mer pourront accoster les quais mêmes de l'usine.

Quant à l'usine de Tyin, elle sera alimentée par un débit constant de 8,5 m³ et sous une différence de niveau de 950 m. L'énergie utilisée sera d'environ 80,000 chx.

Elle sera reliée à la mer par une voie ferrée et un bac à vapeur. La puissance totale dont disposeront sous peu les usines électrochimiques de Norwège sera donc :

Digitized by Google

Usines de	Nottoden	96,000 HP
Id.	Saaheim	227,000 »
Id.	Vamma	57,000 »
Id.	Tyin	80,000 »
Id.	Matre	80,000 »
	Total	540,000 HP

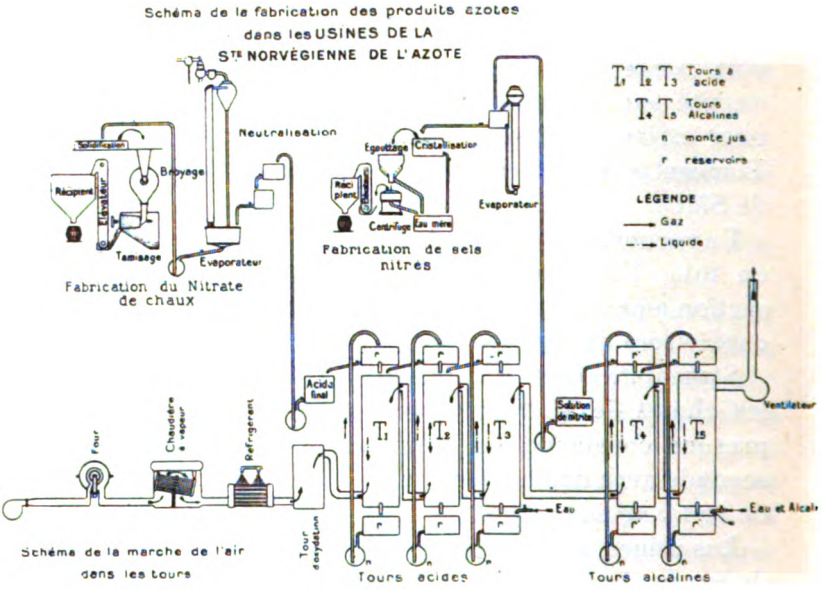


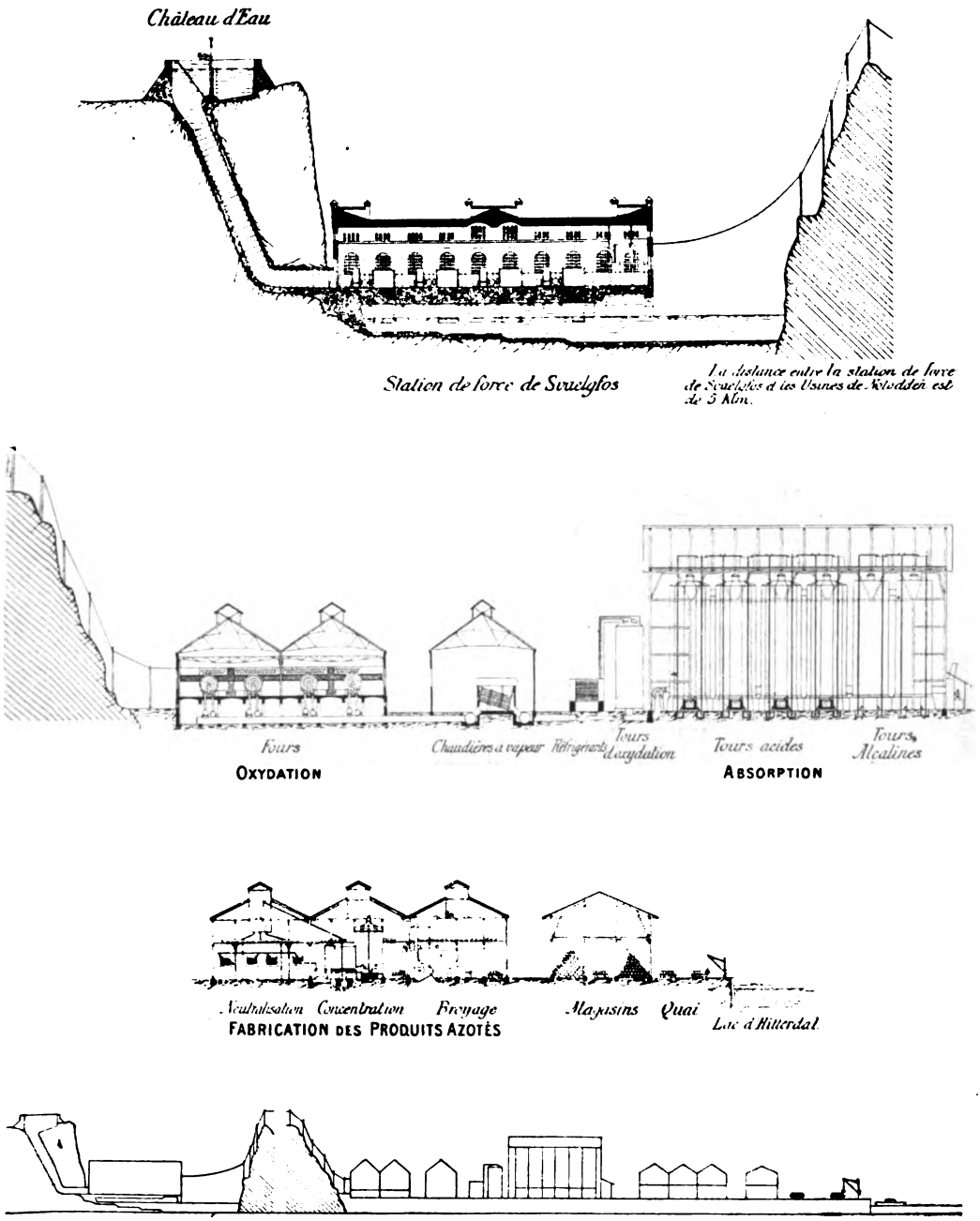
Fig. 13.

Enfin, nous dirons quelques mots de la récupération et des produits fabriqués à Nottoden et à Saaheim (fig. 13 et 14).

Les gaz venant des fours arrivent sous des chaudières, et à leur sortie, on les dirige à travers des refroidisseurs en aluminium. De là, le mélange passe dans de grandes tours d'oxydation où l'oxyde d'azote va se peroxyder. A la

Digitized by Google

COUPE SCHÉMATIQUE DES USINES DE SVAELGFOS-NOTODDEN



Vue d'Ensemble.

Fig. 14.

Digitized by Google

suite de ces appareils se trouvent trois tours où les gaz circulent en sens inverse de l'eau d'absorption, si bien qu'à la base de la première tour, on recueille un acide d'une concentration de 25° Baumé.

Enfin, les gaz renfermant encore 15 à 20 % des produits nitreux sont soumis dans deux dernières tours à l'absorption par une solution alcaline. On recueille ainsi 97 à 98 % de l'azote oxydé. A Nottoden, on applique aussi l'absorption à sec par la méthode Schlösing ; dans ce cas, la totalité du bioxyde d'azote sera fixée.

Produits fabriqués.

Acide nitrique. — L'acide nitrique, que l'on recueille à la base de la première tour, peut être concentré au moyen des chaleurs perdues, et vendu comme tel. On peut aussi l'utiliser pour la préparation d'autres produits dérivés.

Nitrite de soude (voir fig. 13). — Dans les tours alcalines, on peut se servir, pour l'absorption des gaz de queue, d'une solution de soude. On obtient ainsi un mélange de nitrate de soude et de nitrite de soude, le nitrite dominant dans une large mesure.

Par cristallisation fractionnée, on obtient un produit d'une pureté de 98 % et titrant 20 % d'azote.

Nitrite-Nitrate de soude. — Les eaux-mères provenant de l'opération précédente contiennent du nitrate et du nitrite de soude. On les évapore et l'on obtient ainsi un produit titrant 18,6 % d'azote.

Nitrate de potasse et nitrate d'ammoniaque (1). — On fabrique aussi du nitrate de potasse et du nitrate d'ammoniaque. Ces produits sont d'une pureté presque absolue et par conséquent très recherchés.

(1) Bühler. — La fabrication du nitrate d'ammoniaque de Nottoden (*Moniteur Scientifique*, juin 1911).

Digitized by Google

La fabrication du nitrate d'ammoniaque fonctionne à Nottoden depuis 1910. La production journalière peut atteindre 15,000 kilogs. On traite par l'acide nitrique une solution d'ammoniaque de 20 à 30 %. On décante la solution pour éliminer les impuretés et on la fait passer dans un filtre-presse. Ensuite, on concentre et on laisse cristalliser.

Phosphate. — Enfin, au moyen de procédés spéciaux, on prépare des engrais phosphatés et nitratés, engrais d'automne et d'un intérêt tout spécial pour l'agriculteur.

A cette catégorie appartiennent le biphosphate nitrique (30 % d'acide phosphorique, 3 à 4 % d'azote), le biphosphate simple (37 % d'acide phosphorique) et le phosphate d'ammoniaque (60 % d'acide phosphorique soluble dans l'eau et 12 % d'azote ammoniacal).

Nitrate de chaux. — Le nitrate de chaux peut être obtenu directement par l'absorption (système Schlösing); mais, la plupart du temps, elle est réalisée d'une façon indirecte (voir (figure 13).

Dans ce but, on traite, dans des cuves en granit, du calcaire par l'acide nitrique et l'on introduit la solution neutre dans des appareils de concentration. Pour cette opération, on utilise d'ailleurs la vapeur produite dans les chaudières par les gaz chauds. Dès qu'on atteint une teneur convenable, on coule la matière dans des moules, où elle se refroidit et constitue des blocs solides. On peut la livrer dans le commerce sous forme de blocs, mais pour les besoins agricoles, on la broie et on l'ensache dans des barils spéciaux. Ce produit contient 13 % d'azote, malheureusement, il est hygroscopique. Cependant, si l'on prend soin de ne pas ouvrir le baril avant son emploi, la poudre reste bien sèche et l'épandage se fait aisément.

Les expériences faites par M. Sigmund Hals [1] sur

(1) Sigmund Hals. — Hygroscopicité du salpêtre de Norwège. (*Chemiker Zeitung*, 10 décembre 1911).

Digitized by Google

des barils exposés pendant 312 jours dans l'entrepôt de Christiania, ont montré que seule la partie supérieure s'était un peu altérée, mais cependant sans former de magma dur.

Le Dr Rudolph Messel, de Londres, a proposé de convertir le nitrate de chaux en nitrate basique qui reste sec et dont l'épandage est ainsi facilité.

Pour diminuer l'hygroscopicité du nitrate de chaux, on a aussi préconisé l'oléification. D'après les expériences de Seelhort et Simmermacher, les avantages de cette méthode seraient discutables.

Lors de son apparition sur le marché, cet engrais [2] a dû lutter contre l'hostilité des marchands de nitrate chilien, contre l'inertie et la méfiance irraisonnées des cultivateurs.

Des expériences entreprises au sujet de la valeur comparative du nitrate de soude et du nitrate de chaux, il résulte qu'à poids égaux d'azote les résultats obtenus sont les mêmes ; de plus, dans des terrains pauvres en chaux, cette dernière exercerait des effets salutaires.

Si le nitrate de soude peut se mélanger en tout temps avec d'autres engrais facilitant ainsi l'épandage, il n'en est pas moins vrai que le nitrate de chaux se prête à la même opération si on la fait le jour même de son emploi.

L'action du nitrate de chaux est plus rapide que celle du nitrate de soude, car c'est sous la forme de nitrate de chaux que l'azote nitrique est absorbé par les végétaux.

Enfin, nous pouvons aussi noter que l'accumulation de grandes quantités de soude n'est pas sans danger dans les terrains.

---

(2) Grandeau. — L'azote de l'air. Les chutes d'eau et l'agriculture (*Revue générale de Chimie pure et appliquée*, 6 mars 1910).

A. Bertrand. — Aperçu comparatif sur les engrais azotés (*Le Phosphate* et la *Revue Internationale des matières fertilisantes*, 4 mai 1911).

Digitized by Google

On peut donc dire que le nouvel engrais supplée avantageusement au nitrate de Chili et que les résultats défavorables obtenus avec son emploi, dans certains cas, étaient souvent dus à la méconnaissance de la loi du minimum.

D'ailleurs, les expériences d'une foule de savants agronomes, tels que Grandeau, Malpeaux, de Fellitzen, Wagner, Schneidewind, etc., sont formelles sur ce point.

Les chiffres suivants indiquent la production du nitrate de chaux depuis 1903 (1) :

Années.	Nitrate de chaux.
1903	25 tonnes.
1904	550 »
1905	1.600 »
1906	1.600 »
1907	15.000 »
1908	15.000 »
1909	15.000 »
1910	25.000 »
1911	25.000 »

LES USINES PAULING.

Les brevets Pauling sont la propriété de « la Salpetersäure Industrie Gesellschaft », à Gelsenkirchen. « La Luftverwertung Industrie Gesellschaft », qui a la licence de ces brevets pour l'Allemagne, l'Autriche et la Suisse, possède à Patsch, près d'Insbrück, une installation de 12.000 HP, dont le but immédiat est la production d'acide nitrique à différents degrés de concentration. Les fours

(1) Lambert. — *Statistique des Engrais et Produits chimiques destinés à l'Agriculture* (*Annuaire 1912*).

Digitized by Google

Pauling y absorbent à l'heure actuelle une puissance de 1,000 HP, dont le rendement peut être évalué à 65 gr. de HNO_3 par kw/heure. Le courant employé est à 42 périodes; il se produit donc 84 arcs par seconde. L'air est insufflé dans ces fours par un turbo-compresseur sous une atmosphère de pression ; le facteur d'utilisation s'élève à 0,98, et le cos φ de la ligne est égal à 0,7. La flamme aurait une température variant entre 2500° et 3000° ; elle est réduite à la sortie des fours à 1200° environ.

Les gaz contenant 1,5 à 2 % de NO en volume passent d'abord sous des chaudières, réchauffent l'air venant au four et élèvent sa température jusqu'à 300°. Après avoir séjourné quelque temps dans les chambres d'oxydation, ces gaz vont à 5 tours d'absorption. Ces tours ont 5 m. de diamètre et 10 m. de hauteur.

La circulation de l'eau se fait en sens inverse de celle des gaz, de sorte que l'acide recueilli au bas de la première tour titre 30 ou 40 %.

Cet acide nitrique peut être concentré dans des appareils en quartz ou en porcelaine par contact direct avec une partie des gaz chauds dérivés des fours. Ces derniers sont donc chargés de vapeur d'eau et d'acide nitrique. Cet acide est ensuite condensé au moyen d'un appareil refroidisseur à grande surface au travers duquel on le fait passer.

Les gaz restants passent aux tours d'oxydation ; la concentration est limitée à 36° B., ce qui correspond à 50 %, car la vapeur produite s'enrichit de plus en plus en acide nitrique et, pour une concentration de 68 % en HNO_3, elle a la même composition que le liquide. La température d'ébullition sous pression atmosphérique est alors de 123° et le produit distillant a à peu près la formule :

$$2\,HNO_2\ 3\,H_2O.$$

Digitized by Google

On peut, par un procédé spécial aux usines Pauling, porter la concentration à 98 °/₀. Quant aux gaz de queue, ils sont soumis à une absorption alcaline dans deux tours en bois et donnent du nitrite à haute teneur.

En France et dans ses colonies, c'est la Société « Le Nitrogène » qui exploite les brevets Pauling. La puissance utilisée à l'heure présente à cet effet est de 8,000 chevaux, puissance qui pourra être augmentée dans la suite. Les fours réunis par massifs de 3, utilisant du courant triphasé sous 6,000 volts de tension et une fréquence de 50, absorberaient une puissance de 600 à 1,000 kilowatts.

A Roche de Rame, les gaz à la sortie sont envoyés dans des échangeurs de chaleurs, où ils cèdent une partie de leur calorique à l'air entrant dans le four. Ensuite, ils se rendent de là dans deux tours de maçonnerie fonctionnant alternativement et servant au complet refroidissement des gaz. Pendant que l'une d'elles est en action, l'autre est refroidie par un appel d'air extérieur.

Les gaz arrivent ensuite à une deuxième chambre de 10 m. de diamètre et 22 m. de hauteur, où le bioxyde d'azote se peroxde. L'absorption et le traitement des gaz sont identiques d'ailleurs à ceux de l'usine de Patsch.

Enfin, tout récemment, le docteur Rossi (1) a installé en Italie, à Legnano, 6 fours absorbant 4,000 kilowatts. Leur nombre va être porté à 15 et la puissance utilisée sera de 12,000 kilowatts.

Aux Etats-Unis « La Southern Electrochemical Cᵒ de Nitrolee (2) » possède aussi une installation système Paulings de 4,000 kilowatts. Elle utilise l'énergie fournie

(1) L. Gaba. — Usine électrochimique du docteur Rossi à Legnano. (*Rassegna mineraria*, 1er février 1912).

(2) Kilburn Scott. — La fabrication des nitrates au moyen de l'air atmosphérique (*Journal of the Royal Society of Arts*, 1912).

Digitized by Google

par les deux chutes de Great Forks et de Rocky Creek ; le but principal est la fabrication du nitrate de Ca.

Installations projetées. — La Badische Anilin und Soda Fabrik a obtenu du gouvernement bavarois l'acquisition d'une chute de 50,000 HP, située sur l'Alz. On y exploiterait les brevets Schönherr.

Aux Etats-Unis, un syndicat norwégien a décidé de construire une grande usine dans l'Orégon. La puissance utilisée y serait de 250,000 HP.

D'autres usines sont encore projetées au Canada, en Espagne, en Islande, etc.

AVENIR DE LA FABRICATION.

Pour avoir une idée satisfaisante du succès réservé à la nouvelle industrie, il est nécessaire de connaître, approximativement du moins, le prix de revient des produits synthétiques.

Différentes tentatives ont été faites dans ce sens.

C'est ainsi que Ph. A. Guye [1], en admettant un rendement de 500 kilogs d'acide nitrique par kilowatt-an, un prix de revient de 50 francs par kilowatt-an, 200 francs par kilowatt pour les frais d'installation de l'usine, arrive, tous frais de fabrication déduits, amortissements et intérêts compris, aux chiffres suivants :

Acide nitrique (22,2 % d'azote), fr. 255,— la tonne.

Nitrate de chaux à 13 % d'azote, fr. 162,50 la tonne.

Thompson estime que le prix de revient à Nottoden ne dépasserait pas :

Fr. 112,50 par tonne de nitrate de chaux.

Fr. 182,50 par tonne d'acide nitrique.

(1) Ph. A. Guye. *Moniteur Scientifique*, 1907.

Digitized by Google

De son côté Blondin [1] donne des chiffres un peu plus élevés :

Fr. 162,50 par tonne de nitrate de chaux.

Fr. 255,30 par tonne d'acide nitrique.

Enfin, M. Flusin [2], dans une étude très documentée, a aussi calculé le prix de revient des produits synthétiques à Nottoden.

A cet effet, il admet qu'à Svaelgfos le prix de revient du cheval installé, lignes et accessoires compris, ne dépasse pas fr. 156,40 par kilowatt électrique. Le kilowatt-an coûterait donc fr. 28,60.

Quant aux dépenses chimiques, elles seraient de fr. 167,50 par kilowatt installé. Les dépenses d'exploitation par tonne d'acide nitrique oscilleraient entre 55 et 75 francs par kilowatt-an.

Les limites obtenues, d'après ces données, sont :

1° Dans le cas d'un rendement de 500 kilogs d'acide nitrique par kilowatt-an :

Pour la tonne de nitrate de chaux, 128 à 152 francs.

Pour la tonne d'acide nitrique, 218 à 250 francs.

2° Dans le cas d'un rendement de 600 kilogs d'acide nitrique par kilowatt-an :

Pour la tonne de nitrate de chaux, 107 à 126 francs.

Pour la tonne d'acide nitrique, 187 à 217 francs.

Les prix de vente actuels, qui sont de 290 francs pour la tonne de nitrate de chaux et 300 francs pour la tonne d'acide nitrique 36° B° (55 %), montrent que cette industrie possède le plus bel avenir.

Tel est, dans ses grandes lignes, l'état actuel du problème de la fixation de l'azote de l'air que l'on a coutume d'appeler la grande question chimique du XXme siècle.

(1) Blondin. — *Bulletin de la Société Internationale des Électriciens*, 1908.

(2) Flusin. — *Technique moderne*, 1910.

Digitized by Google

Son importance pour l'avenir de la race blanche, son immense portée économique et son haut intérêt scientifique méritaient de retenir l'attention du monde savant.

D'ailleurs, c'est une chose singulièrement remarquable que le rôle prépondérant joué dans cette question par les méthodes scientifiques, car ici l'empirisme n'a eu aucune part.

Le développement de la nouvelle industrie nécessitait l'application des conceptions les plus élevées et ses progrès sont intimement liés à ceux de la science.

Si l'on songe que dix ans seulement nous séparent de la première tentative industrielle et si l'on examine le degré de perfection relative à laquelle on est arrivé, l'on doit conclure que ces résultats merveilleux restent sans précédents dans les annales de la science appliquée.

Aussi, devant ces faits qui tiennent du prodige, devant ce splendide triomphe de l'esprit sur la matière, l'homme, rempli d'admiration, répète les éloquentes paroles de l'immortel Jacobi :

« L'unique objet de la science est l'honneur de l'esprit des peuples ».

Nous adressons tous nos remerciments aux personnes qui ont bien voulu nous documenter sur leurs installations : à M. Guido Pauling, directeur de la Luftverwertungs Industrie Gesellschaft ; à M. Muku, directeur de la Salpetersäure Industrie Gesellschaft, et à M. de La Vallée-Poussin, secrétaire général de la Société Norwégienne de l'Azote, qui, de plus, a bien voulu mettre à notre disposition un certain nombre de clichés.

E. Roselier.

Digitized by Google

CHRONIQUE.

621.345 **Circulaires ministérielles relatives à la réglementation de l'emploi de l'électricité dans les mines belges.**

On nous communique les circulaires suivantes, adressées à Messieurs les Ingénieurs en chef Directeurs des neuf arrondissements des Mines.

MINISTÈRE DE L'INDUSTRIE ET DU TRAVAIL

ADMINISTRATION DES MINES

Police des mines. — Emploi de l'électricité. — Signalisation électrique.

Bruxelles, le 3 décembre 1909.

Des appareils électriques de signalisation, fonctionnant parfois sous des tensions de 110 et 220 volts, commencent à être installés dans les mines du pays.

De telles installations ne tombent pas sous l'application de l'arrêté royal du 15 mai 1895 relatif à l'emploi de l'électricité dans les mines, les minières, les carrières et les usines régies par la loi du 21 avril 1810 ; leur mise en usage n'est donc pas subordonnée à une autorisation préalable et leur fonctionnement n'est pas spécialement réglementé.

La tension relativement élevée du courant électrique dans certains de ces appareils peut cependant présenter du danger, notamment dans les travaux souterrains.

L'article 76 de l'arrêté royal du 28 avril 1884 sur la police

Digitized by Google

des mines, l'article 3 du décret du 3 janvier 1813 et l'article 5 du règlement général du 29 février 1852 sur la police des carrières exploitées par galeries souterraines permettent dans ce cas aux ingénieurs des mines d'intervenir et de proposer aux autorités compétentes les mesures propres à écarter tout danger.

La Commission consultative d'électricité, que j'ai saisie de l'examen de cette question, a tracé à cet égard, à titre d'indication, les règles ci-après :

Dans les travaux souterrains des mines, minières et carrières, les installations de signalisation électrique satisferont aux prescriptions générales sur l'emploi de l'électricité et aux conditions spéciales ci-après :

1° Les piles, accumulateurs, magnétos, dynamos ou transformateurs fonctionnant à l'intérieur des travaux ne seront établis que dans des endroits bien ventilés ;

2° Les récipients des piles et des accumulateurs ne pourront pas être en celluloïd ;

3° Dans les endroits où un afflux de grisou est à craindre, les piles, les accumulateurs et les transformateurs seront pourvus d'enveloppes fermées à clef ; leurs bornes seront rendues inacessibles en service normal. Dans ces mêmes endroits, les dynamos et magnétos seront enfermées dans des enveloppes de sécurité antigrisouteuses, d'une efficacité certaine ;

4° A l'intérieur des travaux, la canalisation ne pourra être constituée que par des câbles armés, sous plomb, protégés contre l'humidité par une enveloppe imprégnée. Ces câbles ne comprendront que les conducteurs des circuits de signalisation.

Les boîtes de distribution et de jonction de ces conducteurs seront pourvues de couvercles hermétiques fermant à clef ;

5° Tous les appareils, touches de contact, boutons

Digitized by Google

d'appel, sonneries, etc., où il peut se produire des étincelles de rupture du courant, seront enfermés dans des enveloppes métalliques étanches, rendant inaccessibles normalement toutes les pièces sous tension ;

6° Ces appareils seront disposés et construits de façon à empêcher que, par la fermeture accidentelle des circuits, ils ne puissent donner lieu à des signaux intempestifs ;

7° La réception de chaque signal sera contrôlée au poste transmetteur par sa répétition automatique ou par tout autre moyen équivalent ;

8° Les agents du service électrique, munis de clefs ou d'outils spéciaux, pourront seuls enlever les couvercles et les enveloppes prévus par les prescriptions nos 3, 4 et 6. Ils seront chargés de la visite et de l'entretien de l'installation et ne pourront y apporter aucun changement sans l'ordre exprès du directeur des travaux.

Si certaines installations de signalisation ne satisfaisaient pas à ces conditions et si leur fonctionnement présentait du danger, vous auriez à user des pouvoirs que les règlements vous confèrent pour faire écarter, aussitôt que possible, toute cause de danger.

Le Ministre de l'Industrie et du Travail,
Arm. HUBERT.

Bruxelles, le 19 septembre 1913.

J'ai soumis à l'examen de la Commission consultative d'électricité différents projets de signalisation électrique dans les puits de mine, sur lesquels les constructeurs avaient sollicité mon avis. Il s'agissait notamment de savoir si les dispositions de ces projets étaient conformes aux prescriptions de l'article 12 de l'arrêté royal du 10 décembre 1910. La Commission, après une étude

Digitized by Google

approfondie de la question, a été d'avis que, pour la bonne marche des appareils de l'espèce, il y avait lieu de compléter les règles tracées, à titre d'indication, par ma circulaire du 3 décembre 1909, en y ajoutant les dispositions ci-après :

1° Les bornes de prise de courant des installations de signalisation électrique seront maintenues sous tension d'une façon permanente, par une source d'énergie ne pouvant donner lieu, ni à des interruptions accidentelles du courant, ni à des variations importantes du voltage. On réalisera notamment ces conditions en faisant usage simultanément d'une batterie d'accumulateurs et d'une génératrice à courant continu.

2° Les signaux transmis du fond à la surface comprendront un signal optique d'avertissement, précédant les signaux acoustiques d'exécution ; ceux-ci seront donnés exclusivement par des sonneries à un coup. Pour les signaux optiques, servant notamment d'indicateurs d'étages, chaque case du tableau sera éclairée par au moins deux lampes montées en dérivation.

3° Pendant la translation du personnel, un signal optique, consistant en une lampe ou une case rouge, s'illuminera à tous les postes de signalisation, avertissant que des personnes vont prendre place ou se trouvent dans la cage. Cette indication sera complétée par un signal acoustique d'« abarin », donné par un certain nombre de coups de sonnette, avant l'entrée des personnes dans la cage.

4° Les relais nécessaires au fonctionnement de la signalisation seront placés à la surface, de manière à ne pas

---

Article 12 de l'arrêté royal du 10 décembre 1910 : Tout puits d'extraction sera muni d'appareils de signalisation permettant de communiquer de chacun de ses accrochages avec la surface et réciproquement. Ces appareils devront être établis de manière à ce que leur fonctionnement ne puisse donner lieu à aucune confusion.

Digitized by Google

introduire dans le fond des appareils délicats et sujets à détérioration.

5° Des dispositifs d'enclenchement seront réalisés de manière à empêcher que plusieurs postes ne puissent signaler simultanément lorsqu'une même sonnerie peut être actionnée de chacun d'eux.

6° Pour communiquer de la surface avec chacun des accrochages, conformément à l'article 12 de l'arrêté royal du 10 décembre 1910, on installera un commutateur permettant d'actionner de la surface l'une ou l'autre des sonneries répétitrices de ces accrochages.

Toutefois, l'existence à chacun des accrochages et à la surface de postes de téléphone haut parleur, reliés par un câble spécial, est très recommandable tant pour réaliser, d'une façon plus complète que par le jeu du commutateur précité, la réciprocité des signaux que pour servir éventuellement de signalisation de secours. Quoi qu'il en soit, le téléphone ne peut être considéré comme assurant seul, de façon à ne donner lieu à aucune confusion, l'échange des signaux entre le fond et la surface.

D'accord avec le Comité permanent des Mines, je me rallie entièrement aux conclusions de la Commission consultative d'électricité.

Il m'a été demandé ce qu'il fallait entendre par le mot *accrochage* dont il est question à l'article 12 du règlement précité. Il faut évidemment entendre par là les étages où se fait normalement le service de l'extraction et du matériel, ou la translation du personnel. En ce qui concerne ceux où les cages n'arrêtent qu'exceptionnellement pour des services divers, notamment pour la translation de quelques réparateurs ou surveillants, il suffit qu'ils soient pourvus d'un moyen de communication (signaux ou téléphone) avec l'un des accrochages où l'on possède les signaux complets.

Digitized by Google

L'obligation de la *réciprocité* des signaux n'a pas toujours été exactement comprise, certains l'ayant interprétée comme l'obligation pour le poste récepteur de répéter chaque signal au poste transmetteur, avant de l'exécuter. Il n'en est pas ainsi ; le principe de la réciprocité des signaux a surtout en vue la possibilité de communiquer de la surface aux divers accrochages, notamment pour provoquer le renouvellement d'un signal mal compris par le personnel du jour. Il n'est nullement nécessaire que celui-ci reproduise exactement le signal reçu, ni que les signaux soient donnés par les mêmes appareils.

Vous voudrez bien vous inspirer des instructions ci-dessus pour l'application de l'article 12 de l'arrêté royal du 10 décembre 1910.

Le Ministre de l'Industrie et du Travail,
ARM. HUBERT.

Digitized by Google

371.20

Résultats des examens de sortie de l'Institut électrotechnique Montefiore.

Session de 1913.

Sont diplômés ingénieurs-électriciens :

1° Dans la section des élèves-ingénieurs :

A. — Session de juillet :

Avec grande distinction : MM. On Wai, de Changchow ; Oberoutcheff, M., de Kieff.

Avec distinction : MM. Emmé, C., de St-Pétersbourg ; Moineau, V., de Paris ; Chichmareff, M., de St-Pétersbourg ; Barmarck, B., d'Odessa ; Van Heemstrée, F., de Fontaine-l'Evêque ; Dacos, F., de Liége ; Botvinnik, L., de Rostoff sur Don ; Fischer, A., de Peisern ; Bereza, G., de Siedlee ; Dobrski, C., de Plonsk ; Vandam, E., de Couillet.

D'une manière satisfaisante : MM. Mancinforte, T., de Montemarciano ; Grouchko, I., de Stavropol ; De Mello, J., de Braga ; Cricchio, A., de Castellamare-Golfo ; Aristakean, M., de Tiflis ; Garcia de Vinuesa, S., de Bujalane ; Hahn, S., de Chrosciele ; Médaillé, W., de Moscou ; Zucarello, J., de Ramacca ; Diakonoff, N., de Moscou ; Can, Ch., de Zugouletz ; Vasco, J., de Nave d'Haver ; Pasquali, U., de Umbertide ; Jacques, V., de Spa ; Levitous, A., de Minsk ; Ramm, S., de Russii.

B. — Session d'octobre :

Avec grande distinction : MM. Souvalsky, A., d'Orenbourg : Khisanichvili, L., de Tiflis.

Digitized by Google

Avec distinction : MM. Mielczarski, S. C., de Belchatow ; Voinesco, M., de Preazna ; Zouperman, M., de Minsk ; Soukiassoff, A., d'Achtarak ; Germenlis, Ch., de Coritza.

D'une manière satisfaisante : MM. Levinsky, M., d'Astrakhan ; Chamoutine, N., d'Odessa ; Pavlovsky, M., de Mohilev ; Wayss, A., de Varsovie : Sarkissianz, A., de Schoucha ; Dolberg, B., de Kieff ; Petrouchkin, J., d'Odessa ; Piontik, J., de Berditchev ; Cittadini, F., de Terni ; Francisci, F., de Todi ; Eichenwald, L., de Mitau ; Chmouilovitch, N.-M., de Brobonisk ; Wou, K.-L., de Han Yang ; Briata, A., de Plaisance ; de Lemos Vianna, A., de Castello-Branco ; Smirnoff, N., d'Odessa ; Kantor, A., de Tombovsk ; de Larionoff, E., de Kieff ; Rojas, D., de Copiapo ; Demouria, M., de Caucase ; Cortese, H., de Tricase ; Akil, E., de Salonique ; Ismaïl, A., de Salonique ; Zuckerwar, S., de Varsovie.

2° Dans la section des ingénieurs :

A. — Session d'avril :

Avec distinction : MM. Martin, G., de Montceau-les-Mines ; Fometesco, C., de Bucarest.

D'une manière satisfaisante : MM. Fog, C., d'Anvers ; Galvanowski, E., de Vabalminkai ; Garlinski, T., de Constantinople ; Hernandez, R., de La Havane : Fernandez, I., d'Oviedo ; Dresen, A., de Maestricht ; Zoubkoff, B., de Dwinsk.

B. — Session d'octobre :

Avec grande distinction : MM. Umé, F., de St-Josse-ten-Noode ; Devivier ; P., de Marchin ; Namur, H., de Marcinelle ; Stievenart, A., de Matagne-la-Petite.

Avec distinction : MM. Close, M., de Schaerbeek ; Chaudoir, P., de Liége ; Païs, C., de Pitesti ; Blum, L., de Grombin ; Flamache, L., de Woluwe ; Ansay, V., de

Digitized by Google

Prayon-Trooz ; Van Griethuysen, C., de Haren ; Moulaert, M., de Bruges ; Wathieu, C., de Montegnée.

D'une manière satisfaisante : MM. Elena S., de San Remo ; Jansen, E., de Bruxelles ; de Rotaeche, J.-M., de Vitoria ; Legrand, L., de Louveigné ; Molle, L., de Tournai ; de la Cuadra, L., de Ceuta (Espagne) ; Westhoff, L., de Liége ; Salez, J., de Bruxelles ; Eltges, G., de Metz ; Regout, P., de Maestricht ; Guicciardi, E., de Milano ; Palante, R., de Namur ; Lemarquis, G. de Bruxelles.

Digitized by Google

BIBLIOGRAPHIE.

621.132 (048) **Cours d'Electrotechnique générale et appliquée** professé à l'Institut électrotechnique de Lille, publié par R. SWYNGEDAUW, professeur à la Faculté des sciences, directeur de l'Institut électrotechnique de Lille, avec la collaboration de F. NÈGRE et P. BEAUVAIS. — Charles Béranger, Paris et Liége, 1913.

Ce tome premier, rédigé par le professeur R. Swyngedauw, est consacré à la dynamo à courant continu. Sa remarquable facture incite à augurer favorablement de la suite, non encore publiée, de ce cours.

L'ouvrage débute par un résumé succinct des lois de l'électricité et du magnétisme ; l'auteur y précise le sens dans lequel ces lois sont appliquées en électrotechnique.

Les chapitres suivants exposent, de manière très complète, la théorie des induits en anneau ; ensuite sont étudiées les armatures en tambour.

Les propriétés des diverses catégories d'enroulements sont clairement présentées et un chapitre spécial est consacré à l'examen des particularités relatives aux induits dentés.

Les questions relatives à la réaction d'induit et à la commutation sont largement développées. Vient ensuite l'étude des caractéristiques des dynamos, suivie de celle des propriétés des moteurs.

L'ouvrage se termine par deux chapitre dont l'un traite du rendement des machines à courant continu, et l'autre des modes de distribution dans lesquels on les utilise.

Digitized by Google

ERRATA.

Page	Ligne	Au lieu de	Il faut
443	7 *a fine*	aurait	on aurait
446	9 *a fine*	volumes	valeurs
447	7 *a fine*	$\frac{\eta_1^4}{4}\Phi^2$	$\frac{\eta_1^4}{4}\psi^2$
	6 *a fine* au numérateur	Θ	Φ
	au dénominateur	Θ	ψ
	2 *a fine*, au dénominateur du 1er terme du second membre.	2	η_1^2
448	7 *a fine*, expression entre crochets	—	—
453	7	q^2	q_2
	14	α_1^2	a_1^2
455	9	S	Z
457	8	a_1	a_1^2
	dernière	U I cos φ	$\frac{\text{U I cos } \varphi}{2}$
458	3	U	$\frac{U}{2}$
458-459	partout	a	$\frac{a}{2}$
459	2	1	4
463	7	OX	sur OX
figures		ω mal écrit (indice)	$c\,o$

Digitized by Google

TABLE DES MATIÈRES.

PARTIE ADMINISTRATIVE.

Procès-verbal de la séance du 26 janvier 1913 3
» » 8 février 1913 8
» » 23 février 1913 55
» » 8 mai 1913 177
» » 18 mai 1913 206
» » 25 mai 1913 207
» » 15 juin 1913 249
» » 30 novembre 1913 489
» » 14 décembre 1913 565
Rapport annuel du Secrétaire perpétuel 3
Adresse inaugurale du Président 7

COMMUNICATIONS TECHNIQUES ET SCIENTIFIQUES. MÉMOIRES.

621.187.5 BOUFFARD, M. Courbes caractéristiques d'une chaudière . 301, 349
538.3 COLARD, O. Cinq notes sur divers sujets d'électrotechnique . . 277
621.313.24 Théorie analytique du moteur asynchrone monophasé . . . 441
621.312.16 DE BAST, O. Note sur le calcul des pôles de commutation . . 208
621.315.14 DESPLANQUES, J. Cercle à calculs spécial pour déterminer les éléments de pose d'un fil 490
621.328 DUCULOT, H. Eclairage des voitures automobiles par dynamos. 137
621.311.6 GERARD, A. Sur les causes des incendies de centrales électriques et leurs remèdes 159
551.493 GERARD, ERIC et CHAUVIN, H. Etude physique des eaux de Spa. Radioactivité et point cryoscopique 512
621.332 KERBAKER, E. A. Electrification des chemins de fer du Midi. Construction des lignes aériennes 178

Digitized by Google

621.312 KÜNTZIGER, J. Le calcul des dimensions des armatures à courant continu 307
621.317.2 LASSALLE, M. Note sur une méthode de mesure des résistances des terres 502
621.313.21 MARTIN, G. Les moteurs Latour série-compensé et shunt-compensé 9
621.313.031.9 MOSSAY, P. A. Les essais commerciaux des moteurs d'induction triphasés 250
621.316 OTS, L. Notes relatives au calcul des réseaux électriques . 417, 464
511.2 PIROT, A. Quelques types d'abaques et leur application à l'électricité 56
621.365.1 ROSELIER, E. Synthèse des oxydes d'azote par l'arc électrique 566
538.3 STEELS, O. Quelques réflexions au sujet des chapitres « Electromagnétisme et Induction » du cours élémentaire d'électricité 323
351.82 : 621.310 UYTBORCK, E. Une législation en matière de distribution d'énergie électrique est-elle désirable en Belgique 212

CHRONIQUE.

621.345 Circulaires ministérielles relatives à la réglementation de l'emploi de l'électricité dans les mines belges 647
351.821 DE BAILLEHACHE, R. La fixation des unités par voie législative. 166
371.20 Résultats des examens de sortie de l'Institut électrotechnique Montefiore 653
341.25 (C. E. I.) THOMPSON, S. Le but et l'œuvre de la Commission électrotechnique internationale. 367
02 Biographie de Lord Kelvin 114
21.33 (945) YYTBORCK, E. L'électrification des chemins de fer du réseau suburbain de Melbourne 477
621.312 VERLINDEN, C. Sur la ventilation des grosses machines. Filtres d'air à jets d'eau 343

BIBLIOGRAPHIE.

CARLIER, J. Traité élémentaire des transports 438
FLEMING, J.-A. Propagation des courants électriques dans les conducteurs téléphoniques et télégraphiques 242

Digitized by Google

MONIER, E. La Télégraphie sans fil, la Télémécanique et la Téléphonie sans fil à la portée de tout le monde 246
PIERARD, E. La Téléphonie 300
STEINMETZ, C.-P. Théorie et calcul des phénomènes électriques de transition et des oscillations 555
SWYNGEDAUW, R. Cours d'électrotechnique générale et appliquée 656
THOMSON, J.-J. Passage de l'électricité à travers les gaz . . . 241
YSEBOODT, G. Les sécurités électriques appliquées aux installations de signalisation à manœuvre manuelle. 245

Digitized by Google

AB
STACK
LIBRARY OF THE UNIVERSITY OF ILLINOIS
17 APR 1914

062 A. I. M. (1)

Bulletin

M. L'HOEST, G., *secrétaire perpétuel*. Avenue de la Couronne, 169, Ixelles.

M. Küntziger, J., *Secrétaire de rédaction*.
M. Dacos, F., *Secrétaire-adjoint*.
M. Chainaye, L., id.

SIÈGE SOCIAL : Rue Saint-Gilles, 31, Liége.

M. GAUTHIER-VILLARS, Éditeur
Quai des Grands-Augustins, 55, Paris.

EXPÉDITIONS ET ANNONCES
Secrétariat administratif, au siège social.

Imprimerie : de Thier
Boulevard de la Sauvenière, 10, Liége

La reproduction des articles, lorsqu'elle n'est pas explicitement réservée, est autorisée pour les publications échangées avec le présent bulletin. Exception est faite toutefois pour les travaux présentés au Concours de la Fondation George Montefiore, pour lesquels l'autorisation des auteurs est, en outre, requise.

Tome XIII. — 3e série. — 1913

Abonnement annuel . . Fr. 20- »
Prix du présent fascicule. Fr. 9-50

N° 12.
Décembre 1913

Publié le 20 mars 1914.

Digitized by Google

Fondation George Montefiore

PRIX TRIENNAL.

CONDITIONS DU CONCOURS DE 1914.

Article I. — Un prix dont le montant sera constitué par les intérêts accumulés d'un capital de 150,000 francs de rente belge, à 3 p. c., sera décerné tous les trois ans, et pour la première fois en 1911, à la suite d'un concours international, au meilleur travail original présenté sur l'avancement scientifique et sur les progrès dans les applications techniques de l'électricité dans tous les domaines, à l'exclusion des ouvrages de vulgarisation ou de simples compilations.

Art. II. — Le prix portera le nom de *Fondation George Montefiore Levi.*

Art. III. — Seront seuls admis au concours les travaux présentés pendant les trois années qui auront précédé la réunion du jury.

Ils devront être rédigés en français on en anglais et pourront être imprimés ou manuscrits. Toutefois, les manuscrits devront être dactylographiés et, dans tous les cas, le jury pourra en décider l'impression.

Art. IV. — Le jury sera formé de dix ingénieurs électriciens, dont cinq belges et cinq étrangers, sous la présidence du professeur-directeur de l'Institut électrotechnique Montefiore, lequel sera de droit un des délégués belges.

Sauf les exceptions stipulées par le fondateur, ceux-ci ne pourront être choisis en dehors des porteurs du diplôme de l'Institut électrotechnique Montefiore.

Art. V. — Par une majorité de quatre cinquièmes dans chacune des sections, étrangers et nationaux (lesquels devront, à cet effet, voter séparément), le prix pourra être exceptionnellement divisé.

A la même majorité, le jury pourra accorder un tiers du disponible, au maximum, pour une découverte capitale, à une personne n'ayant pas pris part au concours ou à un travail qui, sans rentrer complètement dans le programme, montrerait une idée neuve pouvant avoir des développements importants dans le domaine de l'électricité.

Art. VI. — Dans l'hypothèse où le prix n'aurait pas été attribué ou si le jury n'avait attribué qu'un prix partiel, toute la somme rendue ainsi disponible devra être ajoutée au prix de la période triennale suivante.

Art. VII. — Par application des dispositions qui précèdent, le montant du prix à décerner en 1914 est fixé à vingt mille francs.

Art. VIII. — Les travaux dactylographiés pourront être signés ou anonymes. Est réputé anonyme tout travail qui n'est pas revêtu de la signature lisible et de l'adresse complète de l'auteur.

Les travaux anonymes porteront une devise qui sera répétée à l'extérieur d'un pli cacheté joint à l'envoi ; à l'intérieur de ce pli, le nom, le prénom, la signature et le domicile de l'auteur seront écrits lisiblement.

Art. IX. — Tous les travaux, qu'ils soient imprimés ou dactylographiés, seront produits à douze exemplaires ; ils seront adressés franco à M. le Secrétaire-archiviste de la Fondation George Montefiore, à l'hôtel de l'Association, rue Saint-Gilles, 31, Liége (Belgique).

Ils porteront en tête du texte et d'une manière bien apparente la mention « Travail soumis au concours de la Fondation George Montefiore, session de 1914 ».

Le Secrétaire-archiviste accusera réception des envois aux auteurs ou expéditeurs qui se seront fait connaître.

Art. X. — Les travaux dont le jury aura décidé l'impression seront publiés au Bulletin de l'Association des Ingénieurs électriciens sortis de l'Institut électrotechnique Montefiore. De cette publication ne résultera pour les auteurs ni charge de frais, ni ouverture à leur profit de droits quelconques. Il leur sera néanmoins attribué, à titre gracieux, vingt-cinq tirés à part.

Pour cette publication, les textes anglais pourront être traduits en français par les soins de l'Association.

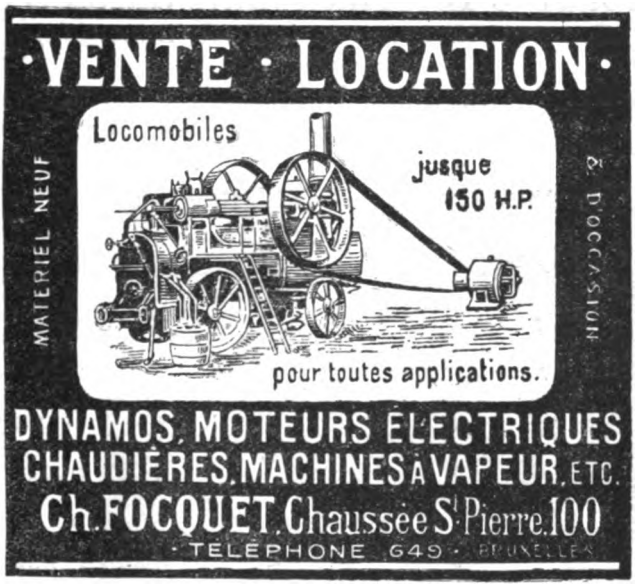
Art. XI. — La date extrême pour la réception des travaux à soumettre au jury de la session de 1914 est fixée au 31 mars 1914.

Pour le Conseil d'administration
de l'Association des Ingénieurs électriciens sortis de l'Institut électrotechnique Montefiore :

Le Secrétaire général, *Gustave L'HOEST.*

Le Président, *Omer DE BAST.*

Digitized by Google



22e Année **Le Numéro : 1.00** **1913**

L'INDUSTRIE ÉLECTRIQUE

REVUE DE LA SCIENCE ÉLECTRIQUE

ET DE SES APPLICATIONS INDUSTRIELLES

Fondée par E. HOSPITALIER

PARAISSANT LE 10 ET LE 25 DE CHAQUE MOIS

24 pages de texte avec illustrations, 16 pges de publicité et 4 pges de renseignements

Un numéro spécimen est adressé à toute personne qui en fait la demande

ABONNEMENTS : FRANCE : Un an, 24 fr. — UNION POSTALE, 26 fr.

Publications de l'INDUSTRIE ÉLECTRIQUE :

Vocabulaire technique, industriel et commercial français, anglais, allemand, par E. HOSPITALIER, 2e édition, considérablement augmentée . . . . . 8 fr.

Premiers secours à donner aux électrocutés. Affiche pour coller dans les ateliers. 0.25 Le cent 20 fr

Protection des travailleurs dans les établissements qui mettent en œuvre des courants électriques. Décret du 11 juillet 1907). Affiche pour coller dans les ateliers, 0.25, franco 0 fr. 30

Vérification des compteurs d'énergie électrique. Système Elihu Thomson, par E. O. KEENAN, chef du Laboratoire de la Compagnie parisienne de l'air comprimé . . . . 0 fr. 30

Liste des stations centrales d'électricité en 1908 avec indications de la puissance nature du courant produit, tension, etc. . . . . 3 fr. 50

Cahier des charges type pour la concession par l'Etat d'une distribution publique d'énergie électrique aux communes (Décret du 20 août 1908) . . . . . 0 fr. 50

Cahier des charges type, pour la concession par l'Etat d'une distribution d'énergie électrique aux services publics (Décret du 30 novembre 1909) . . . . . 0 fr. 50

Arrêté préfectoral, 8 juin 1909, relatif à la concession de la distribution de l'énergie électrique dans Paris . . . . . 0 fr. 50

Economie de combustibles dans les stations centrales, par IZART . . . . 1 fr.

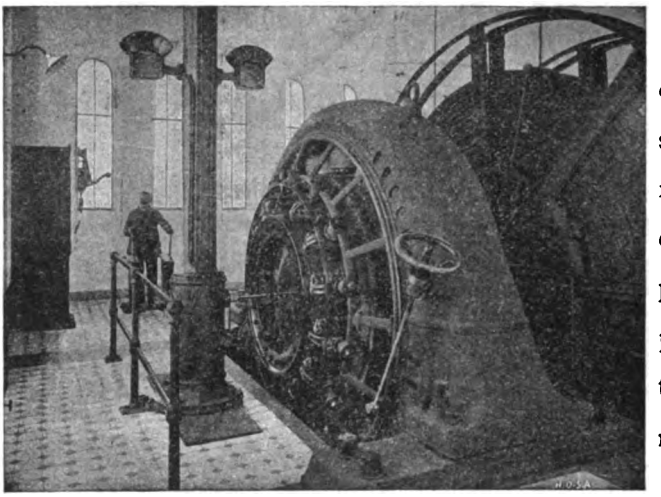
A. LAHURE, Imprimeur-Éditeur, PARIS, 9, Rue de Fleurus, 9e (VIe arrt), PARIS

Digitized by Google

Compagnie Internationale d'Electricité

SOCIÉTÉ ANONYME. — LIÉGE (BELGIQUE)

Toutes les Applications Industrielles de l'Electricité



Installations de grande puissance en courants continus et polyphasés, pour le transport et la distribution de l'énergie.

ÉCLAIRAGE ÉLECTRIQUE

Actionnement électrique des laminoirs (Spécialité)

(SYSTÈME BREVETÉ)

Machines d'extraction

—

Ponts-roulants

—

CABESTANS

—

Grues pour Ports

—

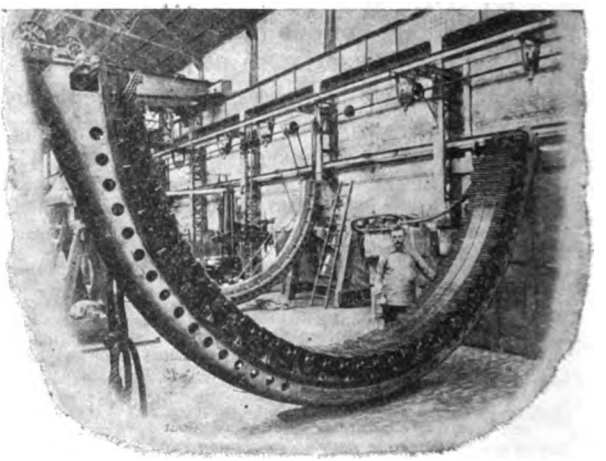
Blocs électriques à tréfiler

—

Lampes à arc

—

ETC., ETC.



Eclairage Electrique des trains de chemins de fer

Système breveté adopté par l'Etat Belge

Digitized by Google

JOURNAL BI-MENSUEL

ELECTRITCHESTVO

(St-Pétersbourg)

1913 — 34me ANNÉE

Organe de la VIe section de la Société Technique Russe Impériale.
Organe des Congrès des Electriciens russes.
Organe de la Société des Electriciens, à Moscou.

Le journal ELECTRITCHESTVO est édité par la VIe Section de la Société Technique Russe Impériale et a pour but la propagation des connaissances actuelles concernant l'énergie électrique et ses applications dans la vie, dans la technique et dans l'industrie.

Le journal est dirigé par le comité de rédaction élu par la VIe Section.

COLLABORATEURS:

Mme E. Bakst, ing., ; S. Baldine, prof. ; MM. A. V. Voulf, professeur à l'Institut Polytechnique de St-Pétersbourg ; B. P. Viouschkov, ingénieur électr ; N. N. Guéorguievski ; S. D. Hefter, ingén.-électr. ; G. O. Graftio, ingénieur des ponts et chaussées ; P. P. Dimitrienko, ingénieur des ponts et chaussées ; L. V. Dreier, ing. ; A. G. Kogan, ing. ; R. R Liander, ing. ; D. M. Maysel, ing. ; T. F. Macariev, ing. mécanic. ; H. L. Orenbach, ing.-électr. ; I. T. Pavlitzki, ing. ; B. Peters, ing ; B. L. Rosing, professeur à l'Institut Technologique ; N M. Sokolski, ingén. ; D. M. Sokoltzov ; G. N. Charoev, ingén. ; E. Choulguine, ing ; A. I. Andréevski, professeur de l'Institut Polytechnique ; P P. Lislov, ing. ; P. A. Kovalev, ing. ; V. K. Lebedinski, prof. ; V F Mitkewich, prof. ; M K. Polivanov, prof. à Moscou ; M. A. Chatelain, prof. à l'Institut Polytechnique de St-Pétersbourg ; C. Schmidt, ing. (Nuremberg), et autres électriciens russes et étrangers.

Programme :

(1) *L'état et le développement de l'électrotechnique et de l'industrie électrique en Russie et en Europe.* — (2) *Les rapports de la VIe section (Electr.) de la Société Techn. Russe Impériale, des Congrès des Electr. et de la Société des Electriciens à Moscou ; les travaux des membres de ces sociétés, les rapports des Assemblées scientifiques, techniques et industrielles.* — (3) *La théorie et la pratique de l'électricité et ses applications.* — (4) *La théorie et la pratique de la partie technique, comme par exemple : machines à vapeur et à gaz, turbines, établissements hydrauliques, pompes, ponts et chaussees, etc., etc.* — (5) *Projets techniques, construction, exploitation des établissements électriques en Russie et en Europe. Statistique.* — (6) *Aperçu de la littérature, chronique, divers, lettres à la Rédaction.* — (7) *Critique et bibliographie concernant l'électrotechnique.*

La revue parait deux fois par mois, (sauf les mois d'été), soit 20 numéros par an.
Le journal donne les ouvrages des Congrès des Electriciens russes.

On souscrit à l'A.I.M., rue St-Gilles, 31, Liége

PRIX :

Pour la Russie: **8** roubles par an ; **5** roubles 6 mois. **12** roubles par an pour l'étranger.

Changement d'adresse : **50** kop. *Il est nécessaire d'indiquer le no de l'envoi.*

Payement partiel par convention avec la Rédaction.

La revue et ses éditions ont reçu en 1896 à l'Exposition des Arts et de l'Industrie de toute la Russie, le premier prix.

La Rédaction vend les éditions du journal ELECTRITCHESTVO.

Adresse: St-Pétersbourg. 7me Rojdestvenskaia, 4, log. 12. — Tél. 37-65.

Un Numéro du journal ainsi que le tarif des insertions seront envoyés sur demande.

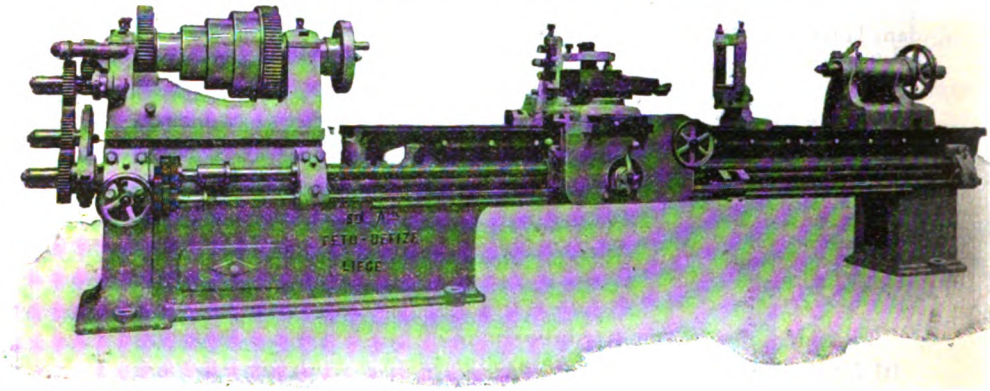
Digitized by Google

Ateliers de Construction de Machines-Outils

Société Anonyme des Établissements

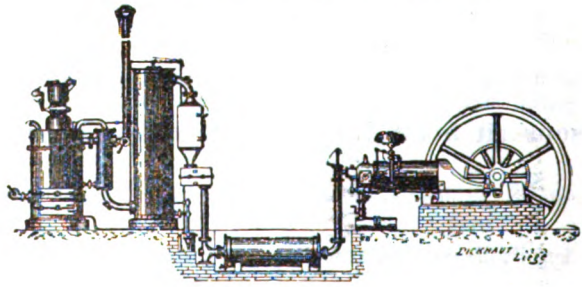
FETU-DEFIZE

LIÉGE



Tour moderne perfectionné pour aciers rapides.

MOTEURS système Otto à Gaz d'éclairage,
à Gaz pauvre et à Essence



FABRIQUE DE COURROIES DE TRANSMISSION

en Cuir et en Tissus.

Envoi franco de Catalogues sur demande.

Digitized by Google

COURS DE COMPTABILITÉ

donné à l'Association par M. Lefèbvre

Ainsi que le renseignait la circulaire de l'A. I. M. du 31 mars 1910, ce cours de comptabilité a été composé spécialement par M. Lefèbvre, chef des services comptables à la Société de la Vieille-Montagne, non pour des personnes devant tenir elles-mêmes une comptabilité industrielle, mais bien pour des ingénieurs devant pouvoir contrôler le travail des comptables mis sous leurs ordres.

Ce cours a été édité en autographie par l'A. I. M.

Les membres de l'A. I. M. qui désireraient l'acquérir sont priés de retourner au Secrétariat de l'Association le bulletin ci-dessous.

BULLETIN

à détacher et à renvoyer au Secrétariat de l'Association, **rue Saint-Gilles, 31, Liége (Belgique).**

Le soussigné désire recevoir le cours de comptabilité donné par M. Lefèbvre à l'A. I. M.

Il joint à la présente la somme de :

fr. 5,20 (1)

fr. 5,75 (1)

prix du cours et de son expédition.

SIGNATURE LISIBLE

(1) Biffer la 1re ou la 2e somme suivant que le soussigné habite l'étranger ou la Belgique.

Digitized by Google

PETIT ALEX.

Ingénieur

Directeur pour

la Belgique.

ACCUMULATEURS

GOTTFRIED HAGEN

POUR TOUTES APPLICATIONS

Bureaux,

Magasins

et Ateliers

93

RUE DE LAEKEN

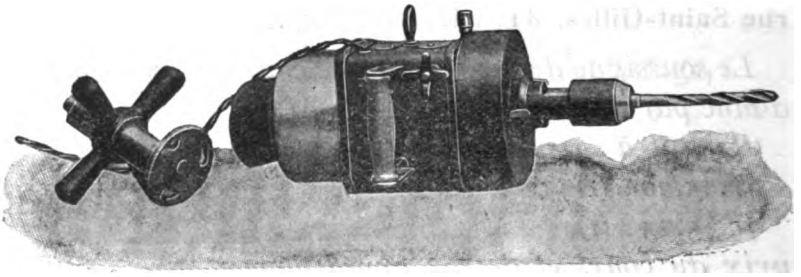
— (Bruxelles.)

Téléphone 4695.

Adresse télégraphique : Accumulhagen.

(BRUXELLES.)

FOREUSE à trois vitesses différentes à commande électrique



Électricité et Électromécanique (Sté A°) 34, rue Bosquet, Bruxelles

La Revue d'Electrochimie et d'Electrométallurgie

1 et 3, Boulevard St-Germain PARIS *Téléphone 824-00*

32 à 60 pages par mois. Contient tout ce qui se publie dans le monde entier sur l'Electrochimie, l'Electrométallurgie, la Chimie physique et sur l'Industrie de ces sciences.

Publication de luxe in-8°, 25 fr. par an. — Etranger, 30 fr.

SPÉCIMEN GRATUIT SUR DEMANDE

Digitized by Google

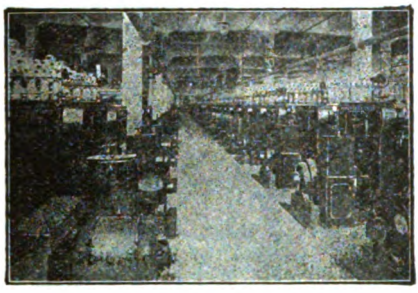
A. E. G.-UNION ÉLECTRIQUE (Soc. an.)

54, CHAUSSÉE DE CHARLEROI, BRUXELLES

Télégrammes : **TENSION**

Téléphones 393 438 2138 4107 4511 11198

INSTALLATIONS D'ÉCLAIRAGE ET DE TRANSPORT DE FORCE



Tissage mécanique à commande électrique directe.

Tout Matériel électrique

Turbines à vapeur

Installations pour Laminoirs et Charbonnages

Machines à souder électriques

Lampes à fil métallique A. E. G.

Catalogues, devis, visite d'ingénieur sur demande sans frais ni engagement

COURROIES

Léon LOBET

VERVIERS

(*Belgique*)

(A. I. M. - A. I. Lg.)

Digitized by Google

LE CARBONE

Société anonyme au capital de 1,400,000 fr.

Ancienne Maison LACOMBE et Cie, 12 et 33, rue de Lorraine, à LEVALLOIS-PERRET (Seine)

Balais en charbon pour dynamos

CHARBONS POUR MICROPHONES

Plaques, cylindres, creusets, etc.

Charbons électrographiques

(Brevets GIRARD et STREET)

PILES ÉLECTRIQUES DE TOUS SYSTÈMES

Piles « Z. O. LACOMBE » Pile sèche « ÉTOILE »

Digitized by Google

8, Rue Nouvelle Paris (9e) **Le Mois Scientifique et Industriel** 8, Rue Nouvelle Paris (9e)

LISEZ-LE

pour Economiser votre Temps

Il est la **Revue des Revues Techniques** et donne le contenu des 540 meilleures publications techniques du monde entier. Le **Foyer de la documentation**, c'est ce qu'il veut être et ce qu'il est depuis 13 ans.

ABONNEMENTS :

France, 20 fr. ;
Etranger, 25 fr. par an
Intégralement remboursés

(Spécimen illustré de 160 pages contre fr. 0.40 en timbres du Pays)

ECRIVEZ-LUI

Il permet à l'ingénieur et à l'industriel de tirer parti de tous les faits nouveaux. — A tous ceux qui ont des ennuis ou qui veulent entreprendre un travail, **l'Institut du M. S. I.** offre ses Conseils pratiques et sa Documentation ; il vous guidera par des Bibliographies, des Mémoires et des Conseils pratiques ; il déposera vos Brevets, en facilitera la négociation ; il vous aidera en vous donnant des Conseils juridiques, techniques ou économiques.

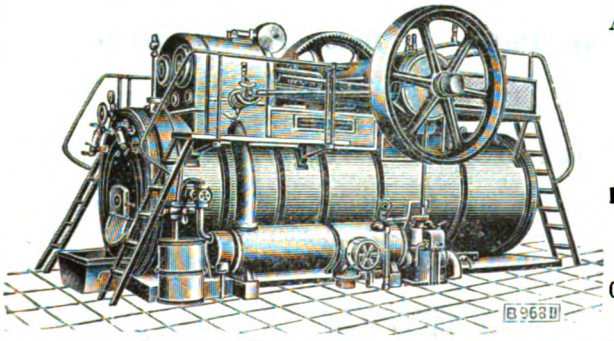
Le FOYER DE LA DOCUMENTATION (90 pages de luxe) envoyé contre 0 fr. 0.50 en timbres du pays.

HEINRICH LANZ, MANNHEIM

MACHINES A VAPEUR

DEMI-FIXES A SURCHAUFFER AVEC DISTRIBUTION PAR SOUPAPES, SYSTÈME LENTZ

FORCE MOTRICE LA PLUS ÉCONOMIQUE



AGENT POUR LA BELGIQUE

E. BURBERG

BRUXELLES

Boul. du Hainaut 102-104.

CATALOGUE GRATUITEMENT

Digitized by Google

L'Electricité Industrielle

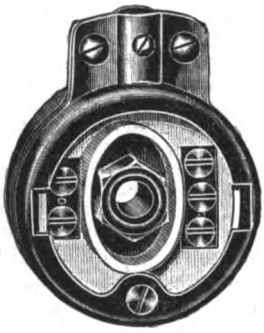
M. BISKE-LIVRON & B. KALINOWSKY

Ingénieurs-Electriciens A. I. M., A. I. Lg.

Etudes et Installations d'Eclairage Electrique

Transports de force — Tramways

Entreprises générales d'Electricité



Représentation Générale
des CONDUCTEURS CUIRASSÉS
Système E. Kühlo

Devis gratuits sur demande

40, RUE DES AUGUSTINS, LIÉGE

— TÉLÉPHONE 95 —

XXIIe ANNÉE

L'Elettricista

XXIIe ANNÉE

REVUE BI-MENSUELLE D'ÉLECTROTECHNIQUE

TÉLÉGRAPHE :	DIRECTEUR :	TÉLÉPHONE
Elettricista - Rome	**Prof. Ange BANTI**	**28 - 47**

ROME - DIRECTION : 135, rue Lanza - ROME

ABONNEMENT ANNUEL :

En Italie, fr. 12-50 — Union Postale, 16 fr.

UN FASCICULE SÉPARÉ, **1** FR.

FASCICULE-SPÉCIMEN GRATIS

L'abonnement doit être pris pour une année au moins et commence toujours le 1er janvier. — L'abonnement est considéré comme renouvelé pour l'année suivante, s'il n'est pas résilié par l'abonné dans le mois d'octobre.

Le meilleur moyen pour s'abonner est d'envoyer un mandat-postal à l'adresse de l'Administration de l' **Elettricista — Rome.**

Digitized by Google

INSTITUT FRANCKEN

FONDÉ EN 1893

INTERNAT-EXTERNAT

18, RUE DARCHIS, LIÉGE

Préparation en un, deux ou trois ans, aux examens d'admission de l'Institut électrotechnique Montefiore, des Ecoles spéciales des Mines, des Arts et Manufactures, des Mécaniciens, des Ponts et Chaussées, de l'Ecole militaire, de l'Ecole des Hautes Etudes commerciales, etc.

Cours ordinaire, du 1er octobre à fin juillet.
Cours de revision, durant les mois d'août et septembre.

Prix du cours ordinaire, 500 fr.; du cours de revision, 150 fr.; de la pension, 600 fr. par trimestre.

Pour prospectus et renseignements complémentaires, s'adresser au Directeur, 18, rue Darchis.

Digitized by Google

DOCUMENTEZ-VOUS en vous abonnant à la

Revue de l'Ingénieur et Index Technique

10e ANNÉE

Publication de l'Art de l'Ingénieur et Compte-Rendu de la Littérature Technique Mondiale qui indexe, classe et publie mensuellement les résumés de centaines de périodiques techniques - - - - - - - - -

ABONNEMENT ANNUEL { Etranger . . . . . Frs 30.—
Belgique et France . . . Frs 25.—

ou mieux en vous affiliant à

L'Institut Technique Industriel

Division A : **Documentation technique et industrielle, courante et rétrospective.** — Division B : **Bureau d'études et de rapports.** Prospections minieres. Mise au point d'Inventions — Division C : **Laboratoires d'Analyses.** Chimie pratique. Admission d'Elèves. Location de Laboratoires pour Inventeurs. — Division D : **Jurisprudence industrielle.** — Division E **Traductions en toutes langues.** *L'I. T. I. est à même de résoudre les différents problèmes qui se présentent dans l'Industrie.*

AFFILIATION : Par an : Frs 50. — Notice spéciale sur demande

DIRECTION & ADMINISTRATION :

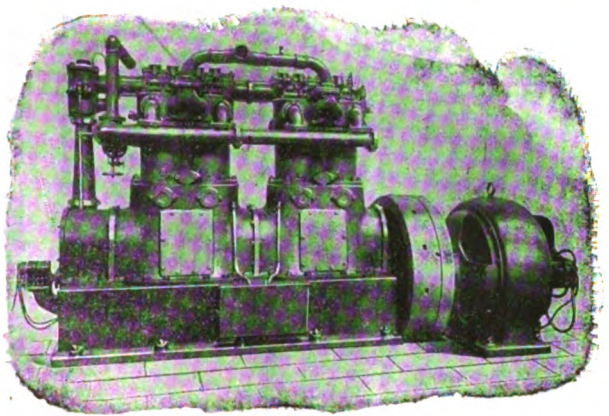
70, Boulevard d'Anderlecht, Bruxelles

TÉLÉPHONE B 3300 TÉLÉGRAMMES : ITI

CASE A LOUER

Digitized by Google

USINES BOULTE-LARBODIÈRE PARIS



Groupe électrogène à gaz.

SIÈGE SOCIAL :

2, Rue de la Pépinière

PARIS

MOTEURS
à Gaz Pauvre

MACHINES
à Vapeur

TYPES SPÉCIAUX

à graissage central

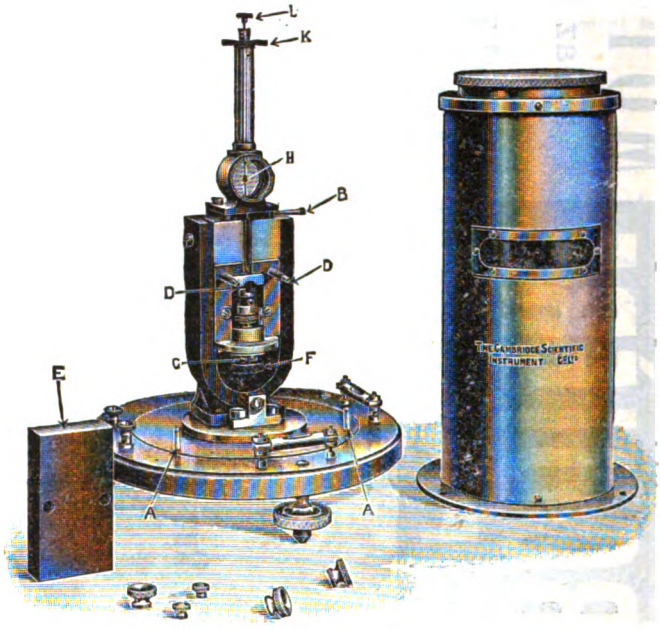
sous pression

à haut rendement

Représentant technique demandé pour la Belgique.

Digitized by Google

Le Thermogalvanomètre de Duddel



Cet instrument se prête tout spécialement aux expériences ayant pour but la mesure de très faibles courants alternatifs à très haute fréquence.

Le Thermogalvanomètre permet de mesurer un courant de *0,00001 ampère* même et d'une fréquence de *quelques millions par seconde*, la déviation obtenue étant identique à celle produite par un courant continu de la même puissance.

Les applications de l'instrument sont donc des plus variées.

Prière de nous demander le nouveau catalogue N° 126B.

THE CAMBRIDGE SCIENTIFIC INSTRUMENT COMPANY LTD

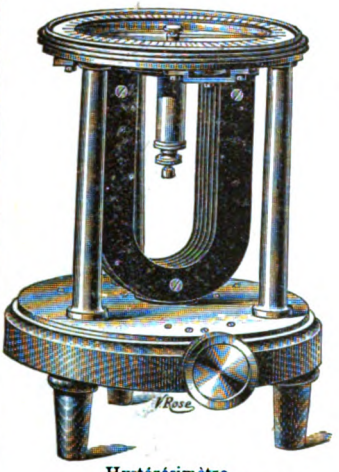
CAMBRIDGE, ANGLETERRE

Correspondance en Français, Allemand et Espagnol.

Digitized by Google

J. CARPENTIER

20, Rue Delambre, PARIS XIVe



Hystérésimètre
BLONDEL-CARPENTIER

Appareils pour l'étude
des propriétés magnétiques du fer

Hystérésimètre Blondel

POUR LA MESURE RAPIDE ET PRÉCISE

de L'HYSTÉRÉSIS DES FERS

Perméamètre Picou

COMBINÉ DE FAÇON A ÉLIMINER

l'influence des joints

PERMET LA MESURE AUSSI BIEN
SUR LES **Tôles** QUE SUR LES **Fers pleins**

La Energia Electrica

Revue Générale d'Électricité et de ses applications

Organe de l'Union Électrique espagnole

Paraît les 10 et 25 de chaque mois

Directeur : D. José Garcia Benitez, Ingénieur.

Rédacteur en chef: D. Eduardo Gallego Ramos, Ingénieur.

Rédaction et Administration : Place de Isabel II, Madrid.

PRIX DE L'ABONNEMENT :

ESPAGNE : Un an, **10** francs ; un semestre, **5** francs ; un trimestre, **3** francs.

ÉTRANGER : Un an, **15** francs ; un semestre, **8** francs.

On remet le tarif des annonces aux personnes qui en font la demande.

Digitized by Google

Digitized by Google

Librairie GAUTHIER-VILLARS

Quai des Grands-Augustins, 55, Paris

Le Catalogue est envoyé sur demande

CONGRÈS INTERNATIONAL DE PHYSIQUE. Exposition universelle de 1900. — *Rapports présentés au Congrès international de Physique* réuni à Paris en 1900, rassemblés et publiés par CH.-ED. GUILLAUME et L. POINCARÉ, Secrétaires généraux du Congrès. 4 beaux volumes grand in-8, avec figures (1900).

On vend séparément : TOME I : « Questions générales. Métrologie. Physique mécanique. Physique moléculaire » . . . . . 18 fr.

TOME II : « Optique, Électricité et magnétisme » . . . . . 18 fr.

TOME III : « Électro-optique et Ionisation. Applications. Physique cosmique. Physique biologique » . . . . . 18 fr.

LES TOMES I, II et III se vendent ensemble . . . . . 50 fr.

TOME IV : *Procès-verbaux annexes*. Liste des membres ; 1901 . . . . . 6 fr.

JACQUIN (CHARLES), Ancien Elève de l'Ecole de Physique et de Chimie de Paris. — *Les Alternateurs à collecteurs monophasés et polyphasés et les dynamos à courant continu à deux paires de balais*. In-8 (23 × 14) de XII-140 pages, avec 40 figures ; 1907 . . 3 fr. 50 c.

JANET (PAUL), Professeur-adjoint à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris, Directeur du Laboratoire et de l'Ecole supérieure d'Electricité de Paris. — *Premiers principes d'Electricité industrielle Piles. Accumulateurs. Dynamos. Transformateurs*, 5e édit. In-8, avec 169 figures ; 1903 . . . . . 6 fr.

Leçons d'électrotechnique générale professées à l'École supérieure d'Électricité. 2 volumes grand in-8, se vendant séparément :

TOME I : *Généralités. Courants continus*, avec 166 figures ; 1904 . . . . . 11 fr.

TOME II : *Courants alternatifs sinusoïdaux et non sinusoïdaux. Alternateurs. Transformateurs*. Volume de 309 pages, avec 156 figures ; 1905 . . . . . 11 fr.

TOME III : *Moteurs à courants alternatifs. Couplage des alternateurs. Transmission par courants alternatifs. Compoundage des alternateurs. Transformateurs polymorphiques* (En préparation).

DRUMAUX (PAUL), Ingénieur civil des Mines, Ingénieur électricien, Ingénieur des Télégraphes. — *La théorie corpusculaire de l'Electricité. Les électrons et les ions*, avec *Préface* d'ERIC GERARD, Directeur de l'Institut électrotechnique Montefiore, (ouvrage couronné au concours international George Montefiore) in-8 (25-16) de 168 pages avec 5 figures ; 1911 3 fr. 75 c.

MINEL (P.) Ingénieur des Constructions navales. — *Régularisation des moteurs des machines électriques*. Petit in-8, avec 49 figures et 2 planches ; 1894. Broché, 2 fr. 50 ; cartonné, 3.

Introduction à l'Electricité industrielle. Potentiel Flux de force. Grandeurs électriques. 2e édition. Petit in-8, avec 49 figures ; 1899. . . . . Broché, 2 fr. 50 ; cartonné, 3 fr

Introduction à l'électricité industrielle. Circuit magnétique. Induction. Machines. 2e édition. Petit in-8, avec 49 figures ; 1900. . . . . Broché, 2 fr. 50 ; cartonné, 3 fr.

PICOU (R.-V.), Ingénieur des Arts et Manufactures. — *La distribution de l'électricité. Installations isolées*. 2e édition. Petit in-8, avec 28 figures ; 1897. Broché, 2 fr. 50 ; cartonné, 3 fr.

La distribution de l'Electricité. Usines centrales. 2e édition. Petit in-8, avec 27 figures ; 1898. Broché, 2 fr 50 ; cartonné, 3 fr.

Canalisations électriques. Lignes aériennes industrielles. Petit in-8, avec 86 figures ; 1898. Broché, 2 fr. 50 ; cartonné, 3 fr.

POINCARÉ (H.), Membre de l'Institut. — *La théorie de Maxwell et les oscillations hertziennes. La Télégraphie sans fil*. 3e édition. In-8 (20-13) de 97 pages, avec 9 figures ; 1908. Cartonné . . . . . 2 fr.

PELLAT (H.), Professeur à la Faculté des Sciences de l'Université de Paris. — *Cours d'Electricité*. (Cours de la Faculté des Sciences.) 3 volumes grand in-8 se vendant séparément.

TOME I : *Electrostatique. Lois d'Ohm. Thermo-électricité*. Volume de VI-329 pages, avec 145 figures ; 1901 . . . . . 10 fr.

TOME II : *Electrodynamique. Magnétisme. Induction. Mesures Electro-magnétiques*. Volume de IV-554 pages, avec 221 figures ; 1903 . . . . . 18 fr.

TOME III : *Electrolyse. Electrocapillarité, Ions, Electrons*. Volume de VI-210 pages avec 77 fig. ; 1908 . . . . . 10 fr.

RODET (J.), Ingénieur des Arts et Manufactures. — *Distribution de l'énergie par courants polyphasés*. Grand in-8, avec 213 figures ; 1903 . . . . . 15 fr.

RODET (J.) *Les lampes à incandescence électriques* In-8 (23-14) de 200 pages avec 90 figures ; 1907 . . . . . 6 fr.

RODET (J.), *Résistance, Inductance et Capacité*. Volume in-8 (23 × 14) de X-257 pages. 76 figures, 1905 . . . . . 7 fr.

VILLARD, Docteur ès Sciences. Lauréat de l'Institut — *Les rayons cathodiques*. 2e édition. In-8 (20-13) de 108 pages, avec 48 figures, cartonné ; 1908 . . . . . 2 fr.

VIGNERON (E.), Ancien Professeur à l'Ecole supérieure d'électricité, et LETHEULE (P.), Ingénieur à la Cie Thomson-Houston. — *Mesures électriques. Essais de laboratoire*. Petit in-8, avec 44 figures ; 1899 . . . . . Broché, 2 fr, 50 cartonné, 3 fr.

VIGNERON (EUG.) — *Mesures électriques. Essais industriels* Petit in-8, avec 58 figures ; 1901 . . . . . Broché 2 fr. 50 ; cartonné, 3 fr.

WITZ (AIMÉ), Docteur ès-Sciences. Ingénieur des Arts et Manufactures, Professeur aux Facultés catholiques de Lille. — *Problèmes et calculs pratiques d'électricité à l'Ecole pratique de Physique*. In-8, avec 51 figures ; 1893 . . . . . 7 fr. 50

Digitized by Google

Fondation George Montefiore

PRIX TRIENNAL.

Voir les CONDITIONS DU CONCOURS DE 1914 au verso du premier feuillet de la couverture.

ARMAGNAT (H.), *La bobine d'induction*. In-8 (23 × 14) de VI-223 p., avec 109 figures, cart., 1905 . . 5 fr.

BERTRAND (J.), de l'Académie française, Secrétaire perpétuel de l'Académie des sciences. — *Leçons sur la Théorie mathématique de l'Electricité*, professées au Collège de France. Grand in-8; 1899 . . . 10 fr.

BICHAT (E.), Professeur à la Faculté des Sciences de Nancy, et BLONDLOT, Maître de conférences à la Faculté des Sciences de Nancy. — *Introduction à l'Etude de l'Electricité statique et du magnétisme*. 2e édition entièrement refondue. In-8 (23-14) de VIII-188 pages, avec 80 fig., 1907 . . . . . 5 fr.

BRUNSWICK (E.-J.) et ALIAMET, Ingénieurs-électriciens. — *Enroulements d'induits à courant continu*. Théorie élémentaire et règles de bobinage Petit in-8 (19 × 12), avec 61 figures; 1904.
Broché, 2 fr. 50; cartonné, 3 fr.

GERARD (ERIC), Directeur de l'Institut électrotechnique Montefiore, annexé à l'Université de Liége, Ingénieur principal des Télégraphes. Professeur à l'Université de Liége. — *Leçons sur l'Electricité*. professées à l'Institut électrotechnique. 8e édition refondue et complétée. Deux volumes grand in-8, se vendant séparément :

TOME I. « Théorie de l'Electricité et du Magnétisme, Electrométrie. Théorie et Construction des générateurs électriques. » Avec 458 figures; 1910 . . . 12 fr.

TOME II. « Transformateurs. Canalisation et distribution de l'énergie électrique. Application de l'électricité à la télégraphie et à la téléphonie, à la production et à la transmission de la puissance motrice, à la traction, à l'éclairage, à la métallurgie et à la chimie industrielle. Avec 459 figures; 1910 . . . . . 12 fr.

Mesures électriques, Leçons professées à l'Institut électrotechnique Montefiore, annexé à l'Université de Liége. 4e édition refondue et complétée. In-8 (25-16) de IX-708 pages avec 304 figures; 1912 . . . . 12 fr.

GERARD (ERIC) et DE BAST (O.) — *Exercices et projets d'Electrotechnique*. 2 volumes in-8 (25-16) se vendant séparément :

TOME I : « Applications de la théorie de l'Electricité et du magnétisme » Volume de VII-240 pages, avec 96 figures; 1907 . . . . . 6 fr.

TOME II : « Applications relatives aux machines et installations électriques. » (Sous presse)

BRUNSWICK (E.-J.) et ALIAMET. *Construction des induits à courant continu*. Volumes in-8 (19-12) se vendant séparément :

— Manuel du bobinier, avec 53 figures; 1905.
— Partie mécanique, avec 35 figures; 1906.
— L'arbre et ses tourillons, avec 35 figures; 1907.
— Coussinets, paliers et autres organes de transmission, avec 38 figures; 1908.
Chaque volume : broché, 2 fr. 50 ; cartonné, 3 fr.

CARVALLO (M.-E.), Docteur ès-Sciences, Agrégé de l'Université, Examinateur de Mécanique à l'Ecole Polytechnique. — *L'Electricité déduite de l'expérience et ramenée au principe des travaux virtuels* 2e édition in-8 (20-13), de 98 pages, avec 12 fig., cart. (*C.S.*) : 1907. 2 fr.

SOMMAIRE. — **Séance du 14 Décembre 1913.** 565
Mémoire : Synthèse des oxydes d'azote par l'arc électrique (*E. Rosélier*). . . . 566
Chronique : Circulaires ministérielles relatives à la réglementation de l'emploi de l'électricité dans les mines belges 647
Résultats des examens de sortie de l'Institut électrotechnique Montefiore . . . 653
Errata 657
Table des matières 658

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

Digitized by Google

UNIVERSITY OF ILLINOIS-URBANA
3 0112 111811359

Digitized by Google